EPIDEMIAS
Las secuelas neurológicas del ébola

FÍSICA
Teorías supracuánticas

ASTRONOMÍA
Todo sobre la misión OSIRIS-REx

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Septiembre 2016 InvestigacionyCiencia.es Edición española de Scientific American

Efectos cerebrales de los videojuegos

Mejoran la atención, la flexibilidad y otras facultades mentales

EDICIÓN GENÉTICA DE PRECISIÓN
LA NUEVA GENERACIÓN DE CULTIVOS MODIFICADOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
EFECTOS CEREBRALES DE LOS VIDEOJUEGOS | SECUELAS NEUROLÓGICAS DEL ÉBOLA | LA MISIÓN OSIRIS-REx
SEPTIEMBRE 2016 N.º 480

00480
9 770210 136004

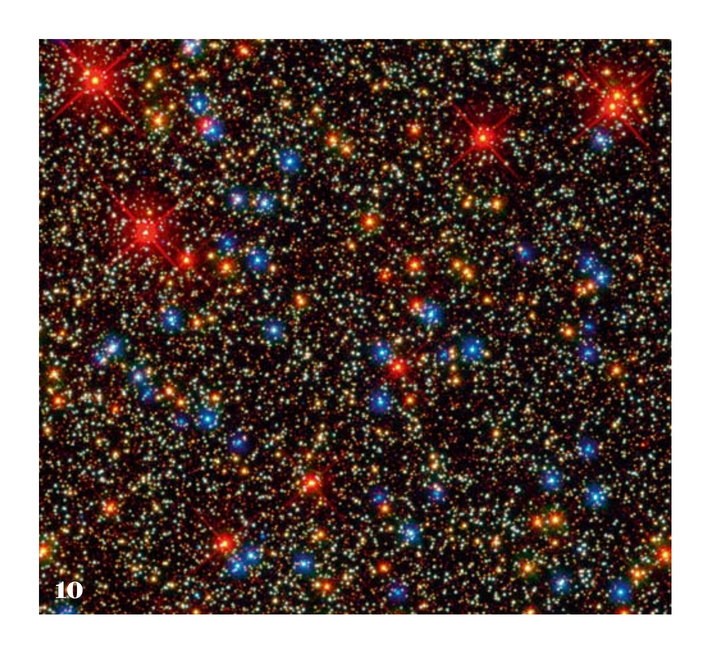
6,90 EUROS



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Septiembre 2016, Número 480

ARTÍCULOS

BRYAN CHRISTIE







INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



En ocasiones considerado un pasatiempo improductivo, en los últimos años varias investigaciones han demostrado que jugar a videojuegos de acción presenta varios beneficios cognitivos, como mejoras en la atención o en la facultad para procesar información con rapidez. De hecho, tales ventajas son mayores que las conseguidas mediante la práctica del llamado «entrenamiento cerebral». Ilustración de Jude Buffum.

redaccion@investigacionyciencia.es



Abril y junio 2016

PLANETA OCULTO

En «En busca del Planeta X» [Investigación y Ciencia, abril de 2016], Michael Lemonick explica que las extrañas trayectorias orbitales de cerca de una docena de objetos del sistema solar (entre ellos, el cuerpo helado Sedna) son compatibles con la hipótesis de que sus órbitas estén experimentando las perturbaciones gravitatorias causadas por un nuevo planeta: una supertierra unas diez veces más masiva que la Tierra situada en los confines más remotos del sistema solar. Si las órbitas de esos cuerpos pudieran analizarse para inferir dónde se encuentra la perturbación, tal vez sería posible encontrar este «Planeta X».

Algunos objetos de fabricación humana también podrían experimentar las mismas perturbaciones. La sonda *Pioneer 10*, lanzada hace décadas y que en la actualidad se encuentra mucho más allá de Plutón, ha aminorado su velocidad más de lo esperado. Si la causa fuese el Planeta X, ¿podría la *Pioneer* añadirse a la lista de objetos que ayudarían a localizarlo?

David Howell
Alton, New Hampshire

Responde Lemonick: *Tanto la sonda* Pioneer 10 *como la* Pioneer 11 *experimentaron una deceleración excesiva al abandonar el sistema solar. La explicación más ampliamente aceptada es que aquella anomalía se debió a las emisiones térmicas de los instrumentos y de las fuentes de alimentación de a bordo. En principio, la gravedad de un planeta desconocido podría haber sido una de las causas de dicha perturbación. Sin embargo, las mejores estimaciones de la masa y de la ubicación del Planeta X sugieren que su efecto gravitatorio sería demasiado débil para explicar el frenado de las sondas.*

LENGUAJE BACTERIANO

En «Los centinelas del sabor amargo» [Investigación y Ciencia, abril de 2016], Robert J. Lee y Noam A. Cohen hablan del uso excesivo de los antibióticos en las sociedades modernas y de sus muchas consecuencias negativas. Con todo, el artículo abunda en referencias a los «invasores» del cuerpo y a la necesidad de aniquilar a estos agentes dañinos.

Sin duda, nuestro fallo colectivo a la hora de entender y valorar las relaciones de simbiosis que mantenemos con un vastísimo número de microorganismos de nuestro entorno nos lleva a comprar cosas como productos de limpieza antibacterianos para cada superficie del hogar y a librar una guerra continua contra algo que, en múltiples ocasiones, nos resulta beneficioso.

Tal vez fuese una buena estrategia cuidar el lenguaje de los artículos sobre enfermedades e infecciones para recalcar que, entre las muchísimas interacciones beneficiosas con microorganismos en las que nos encontramos inmersos, el artículo solo se centra en una interacción dañina.

Ed y Denise McCaffrey

FUGA DE NEUTRONES

En el artículo «El enigma del electrón» [Investigación y Ciencia, junio de 2016] Geoffrey L. Greene y Peter Geltenbort describen dos métodos experimentales para calcular la vida media del neutrón. En el caso del método de confinamiento, y sabiendo que el neutrón no tiene carga y que su radio es muy inferior al radio atómico de cualquier elemento, ¿no cabría esperar que prácticamente todos los neutrones escaparan del recinto?

Carlos Sancho de Grado
Alicante

Responden los autores: *Es cierto que los neutrones carecen de carga y que son diminutos. El «tamaño» intrínseco de un neutrón es del orden de 10^{-15} metros, mucho menor que la distancia que media entre los átomos de un sólido. Si el neutrón se comportase como una partícula clásica, atravesaría la materia con gran facilidad. Sin embargo, las leyes cuánticas nos dicen que el neutrón se comporta también como una onda, y que, para los neutrones «ultrafríos» de muy baja energía empleados en el método del confinamiento, la longitud de onda asociada a la partícula es varios cientos de veces mayor que el espaciado interatómico. De esta manera, la dispersión colectiva de todos los átomos provoca la reflexión de esos neutrones ultrafríos en las paredes del recipiente. No obstante, merece la pena señalar que los neutrones mucho más energéticos —y, por tanto, con una longitud de onda asociada mucho menor— sí atraviesan con facilidad la mayoría de los materiales.*

Erratum corrige

En el pie de imagen de la nota «**Hojas biónicas**», por David Biello [Apuntes; Investigación y Ciencia, agosto de 2016] se clasifica erróneamente a los cloroplastos como células vegetales. El pie correcto debería decir: «Los cloroplastos son los orgánulos encargados de llevar a cabo la fotosíntesis en las células vegetales».

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

METROLOGÍA

La renovación del kilogramo

Los expertos se acercan a la anhelada nueva definición para la unidad fundamental de masa

El kilogramo es una reliquia de 127 años. Se trata del último patrón del Sistema Internacional de Unidades que aún consiste en un objeto físico: un cilindro de platino e iridio del tamaño de una pelota de golf, guardado a cal y canto en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas de París bajo tres campanas de vidrio y a temperatura controlada. La menor cantidad de polvo, humedad o grasa de las yemas de los dedos, podrían alterar la masa del cilindro. En realidad, el llamado *Le Grand K* se encuentra tan bien protegido que los encargados de su custodia solo lo sacan cada 40 años para compararlo con otros prototipos de todo el mundo. Pero, aun así, resulta imposible determinar si los cambios se deben a que *Le Grand K* ha perdido masa o a que una de sus copias la ha ganado por efecto de la contaminación.

Stephan Schlamminger, físico del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) estadounidense, explica que esa incertidumbre en el patrón de masa supone un gran problema para la ciencia moderna, ya que numerosas tecnologías dependen de la definición precisa del kilogramo. Por esa razón, los expertos llevan decenios intentando redefinir esta unidad de masa a partir de las constantes de la naturaleza, lo que implicaría una unidad de medida estable y más accesible [*véase* «Revisión del Sistema Internacional de Unidades», por Robert Wynands y Ernst O. Göbel; Investigación y Ciencia, julio de 2010].



Ahora, Schlamminger y su equipo han desbrozado el camino para lograr ese objetivo basándose en la constante de Planck, el valor numérico que vincula la energía de un fotón con su frecuencia y que se relaciona con la masa a través de la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$. Tal y como describen en un artículo publicado hace poco en *Review of Scientific Instruments*, los investigadores han medido con gran precisión la constante de Planck con «balanza de vatios» de alta tecnología. Para ello, colocaron una masa de valor conocido en un extremo de la balanza y la equilibraron enviando una corriente eléctrica por una bobina móvil de alambre suspendida en un campo magnético. Se valieron entonces del valor de esa fuerza electromagnética para medir la constante de Planck con una precisión de 34 partes en mil millones.

Con todo, antes de que llegue una redefinición del kilogramo basada en la constante de Planck, numerosos equipos tendrán que haber publicado sus mediciones independientes para julio de 2017. En la Conferencia General de Pesos y Medidas de 2018 se evaluarán los datos de cada grupo, así como una determinación efectuada a partir de los átomos contenidos en una esfera de silicio. Después, un complejo programa de ordenador cribará los números para llegar a un valor final. Solo entonces podrá *Le Grand K* retirarse al Louvre, junto al viejo patrón del metro y otros artefactos.

—*Knvul Sheikh*

EN CIFRAS

$6{,}62606983 \times 10^{-34}$ kg m²/s
Constante de Planck medida con la balanza de vatios NIST-4

$0{,}00000022 \times 10^{-34}$ kg m²/s
(implica una desviación de 34 partes en mil millones)
Incertidumbre en la medición del equipo de Schlammiger

370 kilómetros
Distancia por carretera entre Washington D.C. y Nueva York

1,25 centímetros
Incertidumbre en dicha distancia equivalente a 34 partes en mil millones

BREVE HISTORIA DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

1799
El sistema métrico nació durante la Revolución francesa. Con la intención de regularizar el comercio, se escogieron dos patrones de platino para representar el metro y el kilogramo.

1889
La primera Conferencia General de Pesos y Medidas estableció unos prototipos internacionales para el metro y el kilogramo. Junto con el segundo como unidad de tiempo, serían las tres unidades de medida básicas.

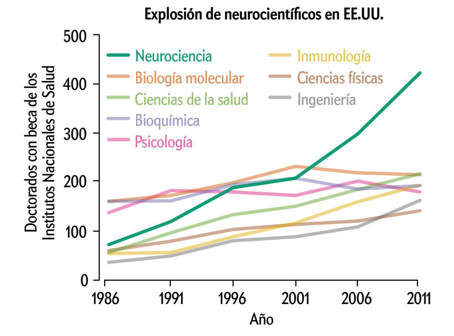
1954
La décima conferencia añadió el kelvin como unidad de temperatura.

1960
El undécimo congreso eliminó el metro material y, en su lugar, adoptó una definición basada en la radiación del kriptón 86. En 1983, esta sería sustituida por una definición basada en la distancia recorrida por la luz en un intervalo de tiempo determinado.

1967
La decimotercera conferencia cambió la definición del segundo: dejó de ser 1/86.400 del día solar medio para convertirse en un cierto número de períodos de la radiación del átomo de cesio 133.

2018
Año en que se prevé que el kilogramo material sea sustituido por una definición basada en la constante de Planck.

CASPAR BENSON, GETTY IMAGES *(pesa)*; FUENTE: INSTITUTO NACIONAL DE ESTÁNDARES Y TECNOLOGÍA *(En cifras)*



NEUROCIENCIA

Exceso de neurocientíficos

¿A dónde irán a parar todos los expertos que la academia no puede absorber?

En las últimas décadas, la neurociencia ha irrumpido como la estrella de las disciplinas biológicas. Sin embargo, su enorme popularidad ha venido acompañada de un descenso en el porcentaje de neurocientíficos que trabajan en la investigación académica; una situación debida principalmente a la falta de fondos.

En 2014, las Academias Nacionales de EE.UU. organizaron un encuentro para ponderar qué augura esta tendencia para los científicos en ciernes que hoy obtienen sus doctorados. Las conclusiones se publicarán este verano en la revista *Neuron*.

Steven Hyman, experto del Instituto Broad del MIT y de la Universidad Harvard que participó en la planificación del encuentro y que hace poco presidió la Sociedad de Neurociencia estadounidense, saluda el aluvión de estudiantes de doctorado que han escogido ese campo, pero hace la siguiente advertencia: «Mientras a los jóvenes con talento se les desanime de continuar en el mundo académico con unas provisiones de fondos tan bajas que debiliten la competitividad o, sencillamente, priven de oportunidades, EE.UU. y el mundo estarán perdiendo un recurso increíblemente precioso».

Ante la falta de puestos académicos, es ahora responsabilidad de los profesores preparar a los estudiantes para otras carreras profesionales, sostiene Huda Aki, de la Universidad de Michigan y autor principal del artículo. No es solo en las instituciones académicas o en las empresas donde los neurocientíficos pueden hacer contribuciones a la sociedad, afirma Akil, también expresidente de la Sociedad de Neurociencia. «Existen las organizaciones sin ánimo de lucro, la política social, la comunicación de la ciencia, las interfaces hombre-máquina, los macrodatos, la educación o cualquier otra área en la que importe el conocimiento del cerebro», concluye el investigador.

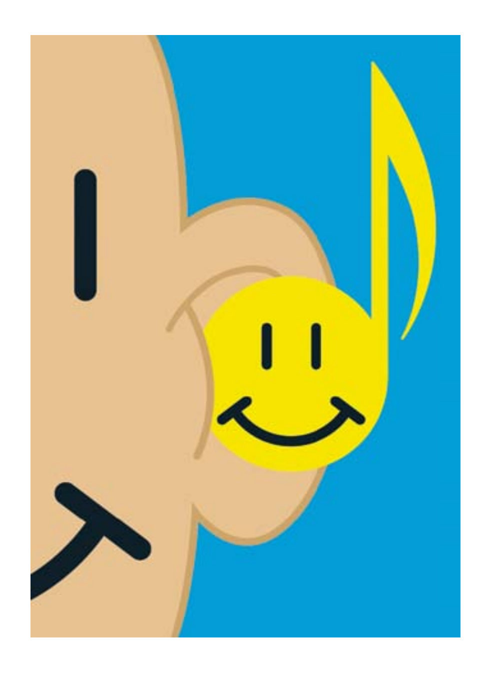
—*Gary Stix*

FUENTE: INSTITUTOS NACIONALES DE SALUD DE EE.UU. (*doctorados*); THOMAS FUCHS (*autismo*)

SALUD

La componente auditiva del autismo

Nuevas pruebas indican que las personas con autismo sí entienden las pistas sociales que transmite la voz



«La cara es el espejo del alma», según el viejo dicho. Sin embargo, las personas con autismo no suelen saber cuándo un rostro transmite emociones (felicidad o tristeza, por ejemplo), algo que muchos investigadores interpretan como un indicio de que, en el autismo, el procesamiento de la información social sufre grandes carencias. Sin embargo, también la voz proporciona pistas emocionales. Y, según varios estudios recientes, las personas con autismo pueden reconocer en ella sentimientos y otros rasgos de humanidad tan bien o incluso mejor que los individuos neurotípicos.

Andrew Whitehouse, director de investigación sobre el autismo en el Instituto Telethon Kids, en Australia, objeta que se trata de estudios pequeños y centrados exclusivamente en adultos con altas capacidades, por lo que no son necesariamente representativos de toda la población con autismo. Helen Tager-Flusberg, catedrática de psicología y ciencias del cerebro en la Universidad de Boston, añade que el éxito en pruebas de laboratorio no implica que el resultado pueda trasladarse a las interacciones sociales del mundo real. No obstante, dichos estudios apuntan a que, al menos en algunos grupos y en ciertas situaciones, el déficit en la identificación de emociones podría reducirse principalmente a la visión. «Desde una perspectiva tarapéutica se trata de una muy buena noticia», señala Kevin Pelphrey, director del Instituto del Autismo y Trastornos del Neurodesarrollo de la Universidad George Washington. «Es mucho más fácil ayudar a alguien a superar una incapacidad para leer emociones en los rostros que tratar una carencia fundamental en el entendimiento de las emociones en todas sus modalidades.»

—*Anne Pycha*

TRES ESTUDIOS SOBRE EL AUTISMO Y LAS EMOCIONES

Daniel Jevitt, del Instituto Nathan Kline de Investigaciones Psiquiátricas del estado de Nueva York, y sus colaboradores mostraron a los participantes fotografías de rostros que expresaban felicidad, tristeza, miedo o ira. Los 19 sujetos con autismo no identificaron bien esas emociones. Sin embargo, al oír grabaciones de voces que transmitían sentimientos parecidos, esos mismos participantes acertaron tan bien como el grupo de control. Los resultados aparecieron publicados en agosto en *Journal of Psychiatric Research*.

Tamami Nakano, neurocientífico de la Universidad de Osaka, y sus colaboradores pidieron a 14 participantes que puntuasen voces que cantaban, tanto reales como generadas por ordenador. Aunque las valoraciones del grupo con autismo y del grupo de control difirieron en las voces reales, los sujetos con autismo otorgaron a las voces artificiales la misma baja nota en humanidad y cualidades emocionales que los voluntarios neurotípicos. El trabajo fue publicado el pasado mes de agosto en *Cognition*.

Un equipo dirigido por **I-Fan Lin**, de la Universidad Metropolitana de Tokio, midió la rapidez con que varias personas determinaban si un sonido procedía de un ser humano o no. Los ejemplos incluían una nota emitida por un violín y una persona que pronunciaba la vocal «i». Los 12 participantes con autismo no solo realizaron la tarea más deprisa que los neurotípicos, sino que lo hicieron mejor: reconocían las voces humanas incluso cuando faltaban importantes componentes acústicos. Los resultados aparecieron en mayo en *Scientific Reports*.

CRIMINALÍSTICA

Sangre delatora

Los restos de sangre dejados en el lugar del delito señalan la edad del criminal

El ADN hallado en el escenario del crimen ayuda a los peritos medicolegales a descubrir la identidad de los sospechosos. La información genética puede arrojar una coincidencia en una base de datos policial o aportar pistas sobre los rasgos físicos, como el color de los ojos o del cabello. Pero el análisis del ADN lleva su tiempo y eso es todo un lujo en muchas ocasiones. Jan Halámek, químico de la Universidad de Nueva York en Albany, investiga nuevas formas de reducir rápidamente el número de sospechosos: su descubrimiento más reciente es un marcador bioquímico de la sangre que indica la edad aproximada de una persona.

La enzima fosfatasa alcalina (ALP) se libera durante el crecimiento óseo y suele alcanzar el máximo a los 18 años en la mujer y a los 19 en el varón, para disminuir a partir de entonces con la edad. Tal y como describen en *Analytical Chemistry*, Halámek y sus colaboradores recurren a ella como un indicador indirecto de la edad. Hasta el momento han logrado predecir con una precisión del 99 por ciento si una muestra ficticia de sangre enriquecida con diversas concentraciones de ALP procedía de una persona sana mayor o menor de 18 años. Halámek intenta ahora acotar aún más la franja de edad.

El estudio era pequeño (se realizó con menos de 200 muestras) y la estrategia todavía no se ha puesto a prueba en situaciones reales. Además, ya existen métodos basados en el análisis del ADN, más lentos, que indican con más precisión la edad, aclara Manfred Kayser, biólogo molecular del centro médico Erasmus, en los Países Bajos. Pero Halámek cree que su prueba podría complementar los análisis existentes y de otro tipo. Espera que las pruebas enzimáticas acaben dando los resultados en el acto, como las modernas pruebas de la glucosa y de embarazo, que se efectúan donde está el paciente. Si se hallan niveles elevados de ALP, explica, los investigadores podrán descartar con rapidez a los sospechosos de cierta edad. Así se podrán excluir muchísimas muestras sin que sea necesario remitirlas al laboratorio de genética.

En experimentos previos, su equipo descubrió que otros biomarcadores, como la creatina cinasa y la alanina aminotransferasa, permiten averiguar si la sangre pertenece a un hombre o a una mujer.

—Peter Andrey Smith

BIOLOGÍA

Un banco de lágrimas

Su creación ayudará a investigar la composición de las lágrimas y a entender mejor por qué lloramos

Comparadas con otras secreciones corporales, las lágrimas apenas están estudiadas. La recolección de las gotas saladas es ardua: los donantes llorones escasean, los hombres raramente se prestan voluntarios a la labor y las lágrimas han de ser frescas para poder analizar debidamente su composición. De resultas de todo ello, los investigadores no se ponen de acuerdo en la finalidad de esta conducta humana. ¿Es el lloro una forma primitiva de comunicación que presentan numerosas especies, como algunos químicos suponen? ¿O es, como proponen los psicólogos, un singular instrumento humano para mantener la cohesión social? El neurobiólogo israelí Noam Sobel tiene un plan para ahondar en la cuestión. Ha perfeccionado un método para ultracongelar las lágrimas y pretende crear un banco de lágrimas destinado a los investigadores de todo el mundo.

Sobel, que trabaja en el Instituto Weizmann de Ciencia en Rejóvot, descubrió en 2011 que las lágrimas femeninas contienen feromonas que reducen los niveles de testosterona de los varones cercanos. Pero las investigaciones han avanzado a paso de tortuga porque las moléculas se degradan con facilidad.

A fin de conservar intacta la composición de las lágrimas, Sobel y su equipo han ideado un método de congelación ultrarrápida a base de nitrógeno líquido que reduce rápidamente la temperatura de la muestra de gotas por debajo de –80 grados centígrados. El proceso conserva la mayoría de los compuestos de la lágrima, aseguran los inventores, que prevén publicar sus resultados a finales de año. A continuación pondrán en marcha un archivo criogénico de lágrimas, clasificadas por su origen, que estará abierto a encargos en línea. «A semejanza de los bancos de muestras de líquido amniótico, sangre y orina, en el futuro dispondremos de un banco de lágrimas», explica Sobel. «Ello nos permitirá completar los estudios en dos semanas, en lugar de seis meses.»

El banco ofrece posibilidades fabulosas, según Saad Bhamla, bioingeniero de la Universidad Stanford que a menudo emplea lágrimas de animales para investigar de qué modo estas crean una película protectora sobre el globo ocular. Como ejemplos de aplicaciones, destaca el interés de Silicon Valley por las lentes de contacto que imiten los visores integrados en el parabrisas, entre otras funciones, y el creciente aumento de la sequedad ocular causada por las largas horas frente a la pantalla del ordenador.

Sobel espera que los estudiosos interesados puedan escoger del archivo lágrimas por edad y sexo; por ejemplo, 200 muestras de varones blancos, de 18 a 25 años de edad. Este acceso personalizado aceleraría los experimentos que abordan numerosas incógnitas acerca de la bioquímica del lloro: ¿influyen las lágrimas en el humor o el apetito? ¿Son distintas las masculinas de las femeninas? ¿En qué se parecen las lágrimas emocionales de las que no lo son, causadas, por ejemplo, al cortar cebollas? Y es que, para Sobel, cuantas más personas lloren, mejor.

—Noah Caldwell

GETTY IMAGES (*huella dactilar*); THOMAS FUCHS (*lágrimas*)

ASTROQUÍMICA

Moléculas especulares en el espacio

Detectan por primera vez moléculas quirales en el espacio interestelar

Las moléculas quirales son aquellas que existen en dos variantes: cada una es la imagen especular de la otra y, de manera similar a lo que ocurre con nuestras manos, no pueden superponerse. Sin embargo, la vida parece preferir las moléculas de una sola quiralidad. El ADN común, por ejemplo, se retuerce en el sentido en que giran las agujas del reloj, como un tornillo que se enrosca a derechas. Por el contrario, casi todos los aminoácidos adoptan la quiralidad opuesta. ¿Por qué una u otra? «Está bastante bien establecido que, una vez que hay un exceso [de una de las quiralidades], la vida prefiere esa», explica Brett McGuire, astroquímico del Observatorio Nacional de Radioastronomía de Charlotesville, en Virginia. Si, por ejemplo, las dos variantes fuesen comunes en el ADN, sus hebras no empalmarían y seguramente la vida no hubiese llegado muy lejos.

Es posible que ese exceso de moléculas de cierta quiralidad se deba a que tales variantes fueron las que los meteoritos trajeron a la Tierra. Otra hipótesis, en cambio, postula que el origen de la quiralidad sería mucho más antiguo. Tal y como explican en un artículo publicado recientemente en *Science*, McGuire y sus colaboradores han descubierto una molécula quiral en el espacio interestelar: el compuesto, óxido de propileno, fue avistado en Sagitario B, una nube de gas y polvo cercana al centro de la Vía Láctea.

Según P. Brandon Carroll, del Instituto de Tecnología de California y uno de los autores del artículo, el hallazgo demuestra que ya había moléculas quirales «mucho antes de que existiesen los sistemas planetarios». Si en su mayoría tales moléculas eran «diestras», habrían podido desencadenar la formación de otras moléculas semejantes antes de que el Sol brillase, entre las que en última instancia se encontraría el ADN. Si sucedió así, ese excedente de moléculas diestras sería un componente de la química terrestre desde la formación del planeta, no uno añadido después por los meteoritos. Stefanie Milam, astroquímica de la NASA, señala que las consecuencias para la astrobiología son «enormes», pues el descubrimiento apunta a que la compleja química asociada a la vida estaría presente, al menos en parte, en otros lugares del universo.

Otros se muestran más escépticos. Según Sandra Pizzarello, bioquímica de la Universidad estatal de Arizona que ha estudiado las moléculas quirales en los meteoritos, no es fácil conectar las observaciones mencionadas con la quiralidad del ADN. Según ella, sigue quedando en el aire qué ocurre en el largo proceso que media entre las nubes moleculares y el origen de la vida. Ahora, McGuire se propone comprobar si la mayoría de las moléculas de óxido de propileno son diestras o zurdas.

—Nathan Collins

Óxido de propileno

Forma «zurda»

Imágenes especulares

Forma «diestra»

Superposición

Hidrógeno

Carbono

Oxígeno

No concuerdan

NEUROCIENCIA

El diccionario visual del cerebro

Al leer reconocemos las palabras que hemos ido almacenando en él

Cuando los niños aprenden a leer repasan laboriosamente cada letra —G-A-T-O—, antes de enlazarlas mentalmente y vincular el resultado con una palabra y su significado. A fuerza de práctica, empero, comenzamos a reconocer las palabras a primera vista. De hecho, nuestro cerebro compila un diccionario visual que almacena en el lóbulo temporal posterior, junto al área que reconoce los rostros, según un nuevo estudio publicado en *Neuroimage*. Este diccionario acaba reemplazando las responsabilidades del centro del habla del cerebro, afirman los especialistas, y es esencial para dominar la lectura.

Laurie Glezer, investigadora posdoctoral de la Universidad estatal de California en San Diego, y sus colaboradores han analizado la actividad cerebral de 27 participantes (anglohablantes nativos y monolingües, con un nivel avanzado de lectura) mientras leían homófonos, palabras que suenan igual pero cuyo significado es distinto, como *vello* y *bello*. Han descubierto que los homófonos estimulan distintos grupos de neuronas del lóbulo temporal posterior, observación que sugiere la existencia de «entradas» visuales distintas para las palabras. Si el cerebro estuviese evaluando los homófonos se activaría el mismo grupo de neuronas.

«De este trabajo se deduce que puede haber regiones que procesen por separado los aspectos visuales y fonéticos, ambos fundamentales para la lectura», aclara Glezer.

Los resultados del estudio podrían servir para diseñar nuevas técnicas de enseñanza. «En el debate acerca del mejor modo de aprender a leer impera la idea de que la fonética es el camino a seguir», afirma Maximilian Riesenhuber, director del Laboratorio de Neurociencia Cognitiva Computacional del Centro Médico de la Universidad de Georgetown y uno de los autores del artículo. En su opinión, este estudio la refuta, porque revela que los lectores expertos elaboran un vocabulario visual al cual recurren cuando ven una palabra familiar como un todo.

De modo similar, la investigación podría esclarecer aspectos sobre la dislexia, destaca Fumiko Hoeft, profesora de psicología de la Universidad de California en San Francisco, ajena al estudio. Tal vez las personas afectadas por este trastorno de la lectura tengan problemas para elaborar o acceder al diccionario visual. En estos momentos, empero, resulta difícil decir dónde radica el defecto, aclara Glezer. La investigadora planea ahora estudios similares en que participen personas disléxicas y otras que sean sordas, que también suelen tener dificultades en el aprendizaje de la lectura.

—Roni Jacobson



AMANDA MONTAÑEZ *(moléculas de óxido de propileno)*; THOMAS FUCHS *(cerebro)*

CONSERVACIÓN

Limpieza en islas mínimas

Cada año, biólogos de EE.UU. visitan algunas de las islas más remotas para observar y proteger la flora y la fauna

Para poner el pie en Nihoa, un islote deshabitado de 69 hectáreas situado en el extremo noroeste del archipiélago hawaiano, es preciso navegar treinta horas, sortear el bravo oleaje en bote neumático hasta llegar a la orilla y escalar un acantilado. Hasta hace poco, el amenazado carricero familiar (*Acrocephalus familiaris*) no vivía en ningún otro lugar del planeta. Pero, en 2011 y 2012, Sheldon Plentovich, biólogo del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE.UU. (SPVS), dirigió un equipo que trasladó 50 de estos diminutos pajarillos en un viaje de tres días hasta Laysán, una isla gemela donde los conejos introducidos habían abocado a la extinción a otra subespecie del carricero hace casi un siglo. Como ha explicado en julio en la revista *Biological Conservation*, la población de Laysán ha prosperado desde entonces hasta alcanzar los 164 individuos, una salvaguarda ante cualquier desastre que pueda abatirse sobre los pájaros de Nihoa.

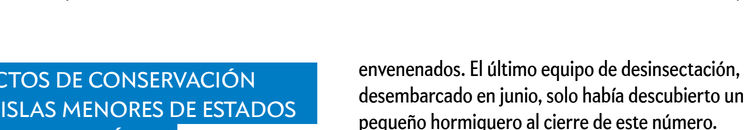
Para Plentovich y otros investigadores que desempeñan su trabajo en las recónditas islas estadounidenses dispersas por el Pacífico, la mayoría sin residentes permanentes e inaccesibles al público, tales aventuras forman parte del día a día. Todos sus proyectos de conservación comparten algo en común: enmendar el daño causado por la negligencia humana (como llevar conejos a Laysán). «Es aleccionador y desconcertante presenciar los desmanes provocados por el hombre, incluso en mitad de la nada», explica.

—*Jesse Greenspan*





RABIHORCADO en el atolón Kure (*1*). Hormigas cabezonas acosan a un tierno pollo de charrán (*2*).


PROYECTOS DE CONSERVACIÓN EN LAS ISLAS MENORES DE ESTADOS UNIDOS EN EL PACÍFICO

Atolón Palmyra: Unas 30.000 ratas (50 por hectárea) habían invadido esta antigua base militar hasta que el SPVS y dos ONG las erradicaron hace cinco años en una operación que contó con helicópteros, tirachinas y cebo envenenado. Stefan Kropidlowski, responsable de la reserva natural del atolón que pasa la mitad del año en casi absoluta soledad, dirige ahora su atención a los cocoteros, que desplazan a los árboles autóctonos de los que tantas aves marinas y cangrejos dependen.

Atolón de Johnston: Antiguo polígono de pruebas nucleares, este grupo de cuatro islas es un paraíso para las aves marinas, a pesar de la contaminación del plutonio, el amianto y otras sustancias tóxicas. La llegada de la hormiga invasora *Anoplolepis gracilipes* amenazó con devastar las poblaciones nidificantes. El insecto pulveriza ácido cuando se abalanza en tropel sobre sus presas, una táctica que acaba deformando a los polluelos. En los últimos seis años, voluntarios del SPVS en turnos de trabajo semestrales han logrado combatir la infestación con comida para gatos y jarabe de maíz envenenados. El último equipo de desinsectación, desembarcado en junio, solo había descubierto un pequeño hormiguero al cierre de este número.

Islas Midway: El invierno pasado, científicos del SPVS descubrieron en esta cadena de tres islas que los ratones estaban devorando vivos a los albatros (estos se niegan a abandonar el nido durante la incubación). El organismo ha iniciado un programa para exterminar a los roedores introducidos en el lugar, célebre por haber sido el escenario de una batalla naval en la Segunda Guerra Mundial.

Atolón Kure: Investigadores y voluntarios llegan a este pedazo de tierra, situado en el extremo norte de las Hawái, para recoger los desechos que arrastran hasta allí las corrientes marinas y en los que queda atrapada la fauna. Cynthia Vanderlip, directora del campamento de trabajo de Kure, y su equipo también trabajan para desmantelar una vieja pista de aterrizaje abandonada, erradicar las foráneas hormigas cabezonas y la margarita *Verbesina encelioides*, así como hierbas y arbustos autóctonos, con vistas a consolidar las colonias de aves marinas. Entre tanto, se ha reintroducido el amenazado pato de Laysán, y el Servicio de guardacostas de EE.UU. planea limpiar los PCB tóxicos que dejó abandonados hace décadas.

CYNTHIA VANDERLIP (*Rabihorcado y Charrán*); IPHES (*Darwin*)


AGENDA

CONFERENCIAS

15 de septiembre
El futuro colisionador circular
Michael Benedikt y José Miguel Jiménez, CERN
Ciclo sobre física de partículas
Fundación BBVA
Madrid
www.fbbva.es > agenda

EXPOSICIONES

Hasta el 11 de septiembre
Darwin y la evolución
Cova Museu de la Font Major
L'Espluga de Francolí
Tarragona
www.iphes.cat > media



La diversidad amenazada
Casa de las Ciencias
Logroño
www.logroño.es/casadelasciencias

La costa de los dinosaurios
Museo de la Ciencia
Valladolid
www.museocienciavalladolid.es

OTROS

3 y 10 de septiembre – Observación
Alcalá Starlight, un verano lleno de estrellas
Observatorio Andaluz de Astronomía
Alcalá la Real
www.oaa.astroalcala.es

16 y 17 de septiembre – Charlas
Naukas Bilbao 2016
Universidad del País Vasco
Jornadas divulgativas
Bilbao
naukas.com > eventos

30 de septiembre
La noche europea de los investigadores
Numerosas actividades de divulgación en todo el territorio nacional
ec.europa.eu/research/researchersnight

EVOLUCIÓN ESTELAR

El misterio de los cúmulos globulares

El hallazgo de distintas poblaciones de estrellas en varios cúmulos estelares jóvenes aviva el debate sobre la naturaleza de los cúmulos globulares del universo temprano

ANTONELLA NOTA Y CORINNE CHARBONNEL

Desde el descubrimiento del primer cúmulo globular en 1665, estas grandes y antiguas agrupaciones de estrellas, que pueden albergar hasta un millón de soles, han fascinado a los astrónomos. Pueden observarse con un telescopio de poco tamaño y se distinguen por su exquisita simetría esférica, lo que las convierte en estructuras únicas en el cielo y fáciles de clasificar. Sin embargo, la historia de su formación y evolución no está clara. En un artículo publicado a principios de este año en la revista *Nature*, Chengyuan Li, de la Universidad de Pekín, y otros autores describen nuevas observaciones de cúmulos jóvenes que podrían ayudar a descifrar el misterio de los cúmulos estelares más antiguos del cosmos.

En su órbita alrededor de la galaxia que los acoge, los cúmulos globulares se mantienen unidos por la gravedad durante tiempos equiparables a la vida de sus estrellas de masa baja. Sus edades varían entre los 10.000 millones y los 13.000 millones de años, lo que establece una cota inferior para la edad del universo. Profusamente estudiados, durante largo tiempo se pensó que estos sistemas eran simples y que albergaban una sola población de estrellas, las cuales se habrían formado todas al mismo tiempo.

En 2004, sin embargo, nuestro conocimiento sobre los cúmulos globulares dio un vuelco. Las medidas fotométricas efectuadas por el telescopio espacial Hubble revelaron que ω Centauri, uno de los cúmulos globulares más masivos de la Vía Láctea, albergaba no una, sino varias poblaciones de estrellas. Más tarde, el estudio de otros cúmulos globulares confirmó que ω Centauri no se trataba de una excepción, sino que representaba más bien el caso general, lo que causó una revolución en nuestra comprensión de este tipo de objetos. También se observó que esas poblaciones estelares exhibían propiedades químicas únicas, no vistas en ningún otro entorno estelar. Todo ello dejó claro que estas agrupaciones de estrellas no son ni mucho menos simples y que, a lo largo de su vida, experimentan más de un episodio de gestación estelar.

Explicaciones problemáticas

Aquel emocionante hallazgo inspiró varios modelos de formación estelar para explicar las propiedades fotométricas y espectroscópicas de las diferentes poblaciones presentes en un mismo cúmulo. Por ejemplo, se propuso que los vientos estelares procedentes de estrellas de masa intermedia en las últimas fases de su vida, así como la materia expulsada por estrellas masivas en rápida rotación, podrían constituir el desencadenante o el origen del material que causa la segunda tanda de formación estelar. También se avanzaron explicaciones basadas en una sola generación de estrellas: aquellas de masa muy baja y con discos protoplanetarios (gas en rotación en torno a estrellas recién formadas) podrían adquirir las propiedades observadas al recoger el material expulsado por binarias interactivas o por estrellas masivas en rápida rotación.

Sin embargo, la mayoría de las teorías adolecen de problemas considerables. Algunas implican que el cúmulo original hubo de ser más masivo de lo que indican las observaciones, por lo que una fracción sustancial de la primera generación de estrellas tendría que haber escapado al halo galáctico. No obstante, esto último choca con las expectativas teóricas sobre la evolución de estos sistemas y con las observaciones de galaxias enanas y de cúmulos jóvenes y masivos en el Grupo Local, el conjunto de galaxias cercanas a la Vía Láctea. El consenso entre la comunidad es que hacen falta ideas alternativas e innovadoras para superar este punto muerto.

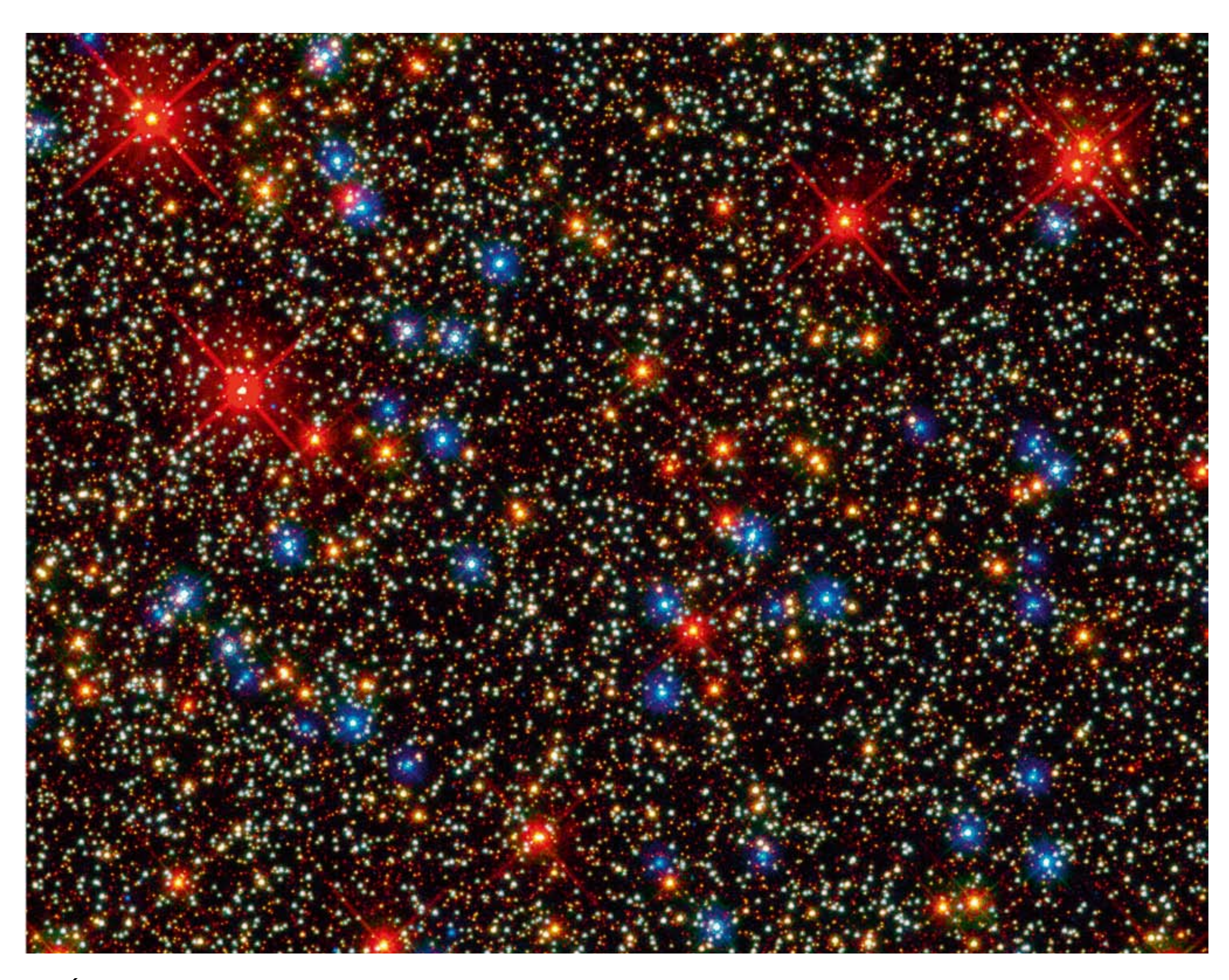
Es aquí donde entran Li y sus colaboradores. Su trabajo ha cuestionado el *statu quo* con el descubrimiento de tres cúmulos masivos y jóvenes —con edades comprendidas entre los 1000 millones y los 2000 millones de años— en las Nubes de Magallanes, dos de las galaxias del Grupo Local. Los autores aportan pruebas convincentes de que en ellos se produjo un brote tardío de formación estelar unos cientos de millones de años después de su nacimiento. La existencia de varias poblaciones estelares, separadas en secuencias bien diferenciadas, puede apreciarse incluso en las gráficas sin procesar de los autores. En dos de los cúmulos, el color de la secuencia más joven es compatible con una mayor abundancia de helio. Esta característica es también esperable en el caso de los cúmulos globulares como resultado de las anomalías químicas debidas a la combustión del hidrógeno a altas temperaturas (el helio es el principal producto de la combustión del hidrógeno).

Acreción de gas

Para explicar los datos, Li y sus colaboradores defienden que los cúmulos que orbitan en los discos gaseosos de sus galaxias anfitrionas podrían acretar suficientes reservas de gas como para formar la siguiente generación de estrellas. Y también indican que este mecanismo podría explicar las múltiples poblaciones estelares de la mayoría de los cúmulos globulares. Para ello, sin embargo, es necesario dar por supuesto que los cúmulos jóvenes y masivos observados en las Nubes de Magallanes son los homólogos modernos de los cúmulos antiguos.

Aunque se trata de una hipótesis plausible, los expertos no han alcanzado un consenso al respecto. La relación entre los cúmulos viejos y jóvenes aún no ha sido establecida por completo. Algunos investigadores piensan que el mecanismo de formación de los cúmulos jóvenes y masivos de nuestras galaxias vecinas podría ser diferente del que condujo a la gestación de cúmulos globulares en el universo temprano. En este sentido, determinar si las propiedades químicas de las estrellas más jóvenes de los cúmulos de Magallanes son similares a las de los cúmulos globulares servirá para abordar la cuestión.

Puede que Li y su equipo aún no tengan todas las respuestas para sustentar



REGIÓN CENTRAL del cúmulo globular ω Centauri, uno de los más masivos de la Vía Láctea, en una imagen tomada por el telescopio espacial Hubble. En 2004, el hallazgo de que esta agrupación estelar albergaba distintas poblaciones de estrellas desencadenó un interesante debate sobre el origen y la evolución de los cúmulos globulares.

NASA/ESA/EQUIPO SM4 ERO DEL HUBBLE

cuantitativamente el modelo general que proponen. Por ejemplo, la masa de la secuencia más joven observada en su estudio es mucho menor que la que se aprecia normalmente en los cúmulos globulares. No explican el origen del helio adicional que, según afirman, se encuentra presente en las estrellas más jóvenes, ni tampoco por qué el contenido metálico del material acretado debería ser el mismo que el del protocúmulo original, a pesar de que las galaxias anfitrionas podrían haber evolucionado químicamente entre los distintos episodios de formación estelar (los astrónomos suelen denominar «metal» a cualquier elemento situado después del helio en la tabla periódica).

Con todo, sus hallazgos aportan un enfoque innovador que merece un examen más profundo. El nuevo trabajo servirá para promover un debate que ya está en curso y para espolear nuevas ideas y futuras observaciones. Y, en un futuro no muy lejano, podría acabar conduciendo a una explicación sólida y concluyente sobre el origen y la evolución de estas bellas estructuras: sin duda, un buen ejemplo de todo lo que puede dar de sí el debate científico.

—Antonella Nota
Instituto para la Ciencia del Telescopio Espacial
Agencia Espacial Europea

—Corinne Charbonnel
Observatorio Astronómico de la Universidad de Ginebra
Instituto de Investigación en Astrofísica y Planetología de Toulouse

Artículo original publicado en *Nature* 529, págs. 473-474, 2016. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

ω Centauri: The population puzzle goes deeper. Luigi R. Bedin et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 605, págs. L125-L128, marzo de 2004.
Formation of new stellar populations from gas accreted by massive young star clusters. Chengyuan Li et al. en *Nature*, vol. 529, págs. 502-504, enero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cúmulos globulares jóvenes. Stephen E. Zepf y Keith M. Ashman en *IyC*, diciembre de 2003.
Origen y evolución de los cúmulos estelares. Steven W. Strahler en *IyC*, mayo de 2013.

ECOLOGÍA

Respuesta de los microorganismos de los suelos áridos ante el cambio climático

El aumento de la aridez disminuye la abundancia y diversidad de las bacterias y hongos, lo que acelera la degradación de estos ecosistemas

FERNANDO T. MAESTRE

Las comunidades microbianas del suelo, formadas principalmente por bacterias y hongos, son un componente clave de los ecosistemas naturales y agrícolas, ya que participan de manera activa en numerosos procesos ecológicos fundamentales para el mantenimiento de la vida sobre nuestro planeta. Entre estos cabe destacar la descomposición de la materia orgánica y la fijación de nitrógeno atmosférico en el suelo, mecanismos a través de los cuales se aumentan la fertilidad edáfica y la disponibilidad de nutrientes para las plantas. La actividad de los microorganismos resulta fundamental en los sistemas agrícolas y los ecosistemas terrestres, que nos brindan servicios tan importantes como la producción de alimentos y la fijación o retirada del CO_2 de la atmósfera (cuya concentración hacemos aumentar con nuestras actividades, entre ellas la deforestación y la quema de combustibles fósiles).

Pese a las funciones esenciales que desempeñan las bacterias y los hongos del suelo, tenemos un gran desconocimiento sobre cómo se verán afectados por el cambio climático en el que nos hallamos inmersos. Las repercusiones pueden ser particularmente importantes en las zonas áridas, en las que el índice de aridez, definido como la relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (cantidad teórica de agua que puede perderse desde un terreno cubierto de vegetación y bajo condiciones óptimas de humedad debido a la evaporación directa del suelo y la transpiración de los seres vivos) es inferior a 0,65. Estas zonas poseen una enorme relevancia a escala mundial, ya que cubren el 41 por ciento de la superficie terrestre y alojan al 38 por ciento de la población humana. Asimismo, debido a las extremas condiciones climáticas y ambientales a las que se hallan sometidas, resultan muy vulnerables al cambio climático y a la degradación de la tierra y la desertificación. Tales amenazas ponen seriamente en peligro los medios de subsistencia de 1500 millones de personas de regiones en desarrollo que dependen directamente de los servicios que les prestan los ecosistemas para satisfacer la mayoría de sus necesidades. Además, las predicciones indican que la importancia de las zonas áridas se va a incrementar en el futuro: los estudios más recientes apuntan a que, hacia finales de este siglo, su superficie se extenderá un 23 por ciento en todo el mundo como consecuencia del cambio climático.



LOS ECOSISTEMAS ÁRIDOS, como la estepa de la Patagonia argentina, ocupan el 41 por ciento de la superficie terrestre, y se espera que su extensión aumente en el futuro debido al cambio climático.

JUAN GAITÁN

Para comprender mejor las consecuencias ecológicas del cambio climático y establecer medidas efectivas para mitigarlo o adaptarnos a él, es fundamental conocer sus efectos tanto en las comunidades microbianas del suelo como en los procesos ecosistémicos que dependen de estas. Con el fin de contribuir a llenar los vacíos actuales de conocimiento en este tema, el grupo de investigación que dirijo se propuso estudiar las relaciones entre las bacterias y los hongos del suelo y distintos factores ambientales (clima y parámetros edáficos, como el *p*H y el contenido en carbono orgánico) y servicios ecosistémicos clave, entre ellos la producción de biomasa vegetal y la fertilidad del suelo en zonas áridas de todo el mundo.

El reto del muestreo mundial

Con el fin de obtener muestras representativas de los ecosistemas áridos de todo el planeta, contamos con la colaboración de una treintena de investigadores pertenecientes a diez países. Ello nos permitió aunar recursos materiales y humanos para muestrear 80 ecosistemas áridos localizados en todos los continentes (excepto la Antártida), algo que hubiera sido imposible si cada uno de los investigadores hubiera trabajado por separado.

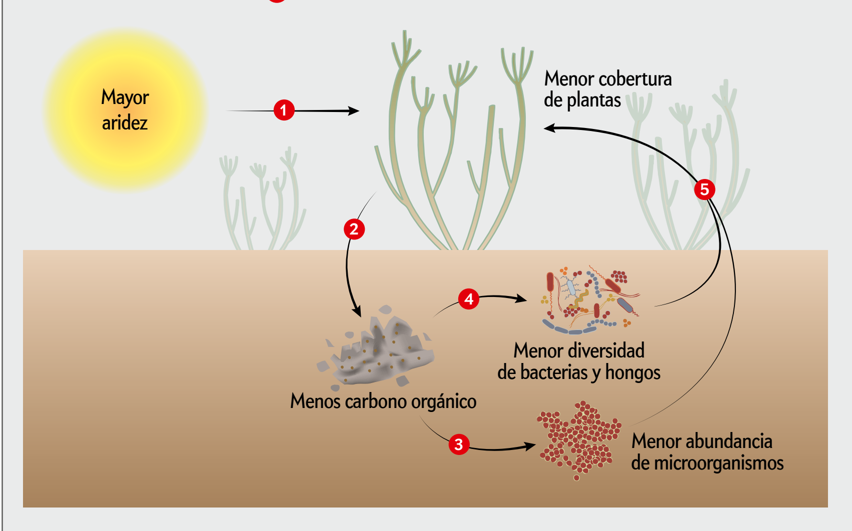
Las zonas estudiadas se extienden por el hemisferio norte a lo largo de una franja geográfica que abarca las planicies centrales de Estados Unidos y México; España, Marruecos y Túnez en el entorno mediterráneo; Israel e Irán en Oriente Medio; y las estepas de la región china de Mongolia Interior. En el hemisferio sur estudiamos, además, zonas de Chile, Argentina y Australia, entre otras. Asignamos, por último, un tercer eje de muestreo en Venezuela, donde también existen ambientes semiáridos.

Desde nuestro laboratorio se diseñaron los protocolos de muestreo que se utilizaron en todos los ecosistemas estudiados —lo que permitió obtener datos estandarizados sobre las principales características del suelo y la vegetación que se desarrollaba en estos lugares—, se procesaron todos los datos y, en colaboración con Antonio Gallardo, de la Universidad Pablo de Olavide, se analizaron distintas variables edáficas relacionadas con la fertilidad del suelo. Además de estos análisis, utilizamos técnicas basadas en la cuantificación y secuenciación del ADN de los hongos y las bacterias presentes en las muestras edáficas recolectadas en todas las zonas de estudio para conocer la abundancia y diversidad de las poblaciones microbianas, tarea realizada en colaboración con Manuel Delgado Baquerizo y Brajesh Singh, de la Universidad del Oeste de Sídney.

En conjunto, este estudio supuso un importante reto logístico, ya que, amén de la continua coordinación y comunicación entre los participantes, necesarias para que el protocolo de muestreo se aplicara correctamente en todos los ecosistemas evaluados, las muestras de suelo tuvieron que congelarse tan pronto los investigadores regresaron a sus laboratorios (para evitar así la degradación del ADN), y enviarse en ese estado a la Universidad Rey Juan Carlos para su extracción y posterior análisis.

MAYOR ARIDEZ, ECOSISTEMAS MÁS POBRES

El cambio climático está intensificando la aridez de las zonas áridas del planeta, lo que repercute en los microorganismos del suelo a través de distintos mecanismos. El más importante es el que se deriva de la menor cobertura vegetal (1), que tiene como consecuencia una disminución del carbono orgánico del suelo (2). Debido a que este constituye la principal fuente de energía de bacterias y hongos, esto afecta a los microorganismos, que ven mermada su abundancia (3) y su diversidad de especies (4) en el suelo. Ello empobrece la fertilidad edáfica, lo que a su vez disminuye la productividad de la vegetación, que ve reducida aún más su cobertura (5).



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, A PARTIR DE LA ILUSTRACIÓN DE CONCEPCIÓN GARCÍA CANO

Menos abundantes y menos diversos

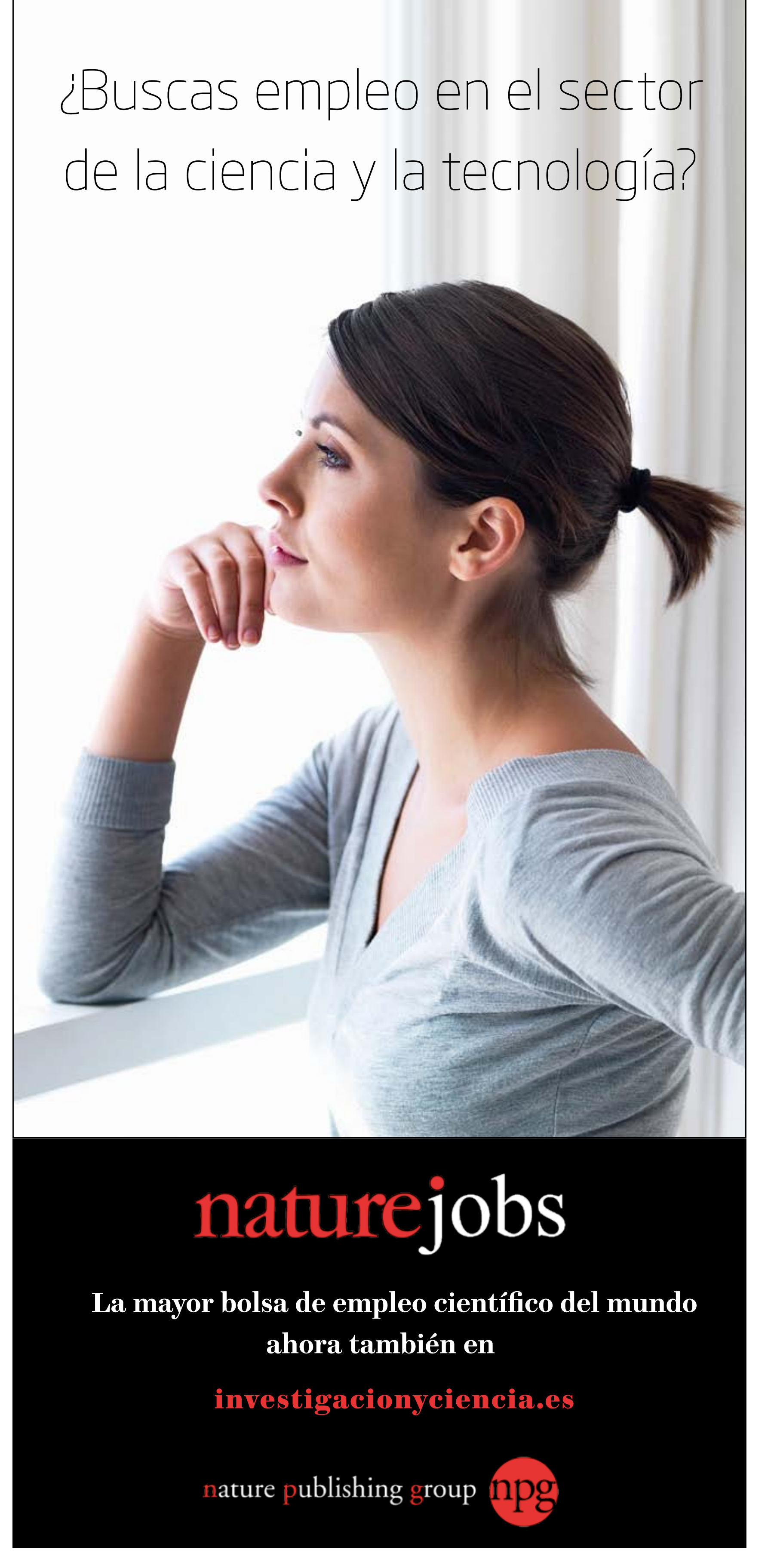
Factores climáticos como el índice de aridez son de vital importancia en las zonas áridas, debido a que el agua es allí el principal factor limitante de la actividad biológica. Distintos modelos climáticos predicen un aumento generalizado de la aridez en las zonas áridas para las próximas décadas. Así pues, lo primero que hicimos fue evaluar sus efectos en las comunidades microbianas del suelo, para lo cual comparamos la abundancia y diversidad microbiana entre zonas con distinto grado de aridez.

Los resultados obtenidos indican que el aumento de la aridez disminuye la abundancia y diversidad de las bacterias y hongos del suelo en los ecosistemas estudiados. Una vez advertida esta respuesta, nos pusimos a investigar los mecanismos que la podían sustentar. Observamos así que, conforme aumenta la aridez, disminuye la cobertura vegetal y, por consiguiente, lo hacen también los aportes de carbono orgánico al suelo por parte de las plantas (una parte del carbono que estas obtienen mediante la fotosíntesis va a parar al suelo a través de procesos como la producción de exudados desde las raíces y la descomposición de la hojarasca). Hemos descubierto que es precisamente esta disminución del contenido de carbono orgánico del suelo uno de los principales determinantes de la menor abundancia y diversidad de bacterias y hongos relacionadas con el incremento de aridez, ya que estos microorganismos utilizan el carbono procedente de las plantas como fuente de energía.

Numerosas investigaciones realizadas en las últimas dos décadas, incluidas algunas llevadas a cabo por nuestro grupo en zonas áridas, han puesto de manifiesto que el número de especies de plantas en las comunidades de estos ambientes guarda una relación positiva con distintas funciones y servicios ecosistémicos, como la producción de biomasa, el secuestro de carbono y la fertilidad del suelo. No obstante, hasta la fecha ningún estudio había explorado estas relaciones teniendo en cuenta las comunidades microbianas del suelo a escala global. Nosotros aprovechamos nuestro muestreo para evaluar cómo los cambios en la diversidad microbiana afectaban a la producción de biomasa vegetal y a la fertilidad del suelo en zonas áridas de todo el planeta.

Al analizar los datos hallamos una relación positiva entre la diversidad microbiana y las funciones y servicios provistos por la comunidad vegetal, una relación que estaba determinada fundamentalmente por la diversidad de los hongos del suelo. Estos resultados indican que cualquier pérdida de diversidad microbiana, como la que puede derivarse del aumento de aridez asociada al cambio climático, tendrá una repercusión negativa en las funciones y servicios que nos proporcionan los ecosistemas áridos.

Al estudiar más a fondo los resultados, observamos que uno de los factores que determina la diversidad de los microorganismos del suelo en las zonas estudiadas es precisamente la diversidad de



plantas, lo que nos sugiere que los efectos positivos de la diversidad vegetal en el funcionamiento del ecosistema que habíamos observado en estudios anteriores están fundamentalmente causados por las interacciones entre las plantas y los microorganismos del suelo.

Nuestro estudio es el primero que ha evaluado el modo en que el aumento de aridez afecta a las comunidades de bacterias y hongos del suelo bajo condiciones naturales a escala global. Los resultados aportan una valiosa información no solo sobre los factores que determinan la abundancia y diversidad de estos organismos, sino sobre su importancia ecológica y sus posibles respuestas ante el cambio climático. Estas pueden verse exacerbadas por procesos como la pérdida de cubierta vegetal y el aumento de la erosión del suelo asociados al sobrepastoreo, que es una de las principales causas de degradación de la tierra y desertificación de las zonas áridas.

Los siguientes pasos de nuestra investigación se centrarán, por tanto, en estudiar de forma conjunta cómo el aumento de la aridez y de la presión de pastoreo afectan a las comunidades vegetales y de microorganismos del suelo, así como a las relaciones entre estos últimos y la capacidad de los ecosistemas áridos de proporcionar servicios ecosistémicos, que son el soporte básico para el bienestar y desarrollo de las poblaciones humanas en las zonas áridas de todo el planeta.

—Fernando T. Maestre
Dpto. de biología y geología, física y química inorgánica
Universidad Rey Juan Carlos
Móstoles, Madrid

PARA SABER MÁS

Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands. F. T. Maestre et al. en *Science*, vol. 335, págs. 214-218, 2012.
Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands. F. T. Maestre et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 112, págs. 15.684-15.689, 2015.
Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems. M. Delgado-Baquerizo et al. en *Nature Communications*, vol. 7, pág. 10.541, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las zonas áridas, cada vez menos fértiles. David A. Wardle en *IyC*, junio de 2014.

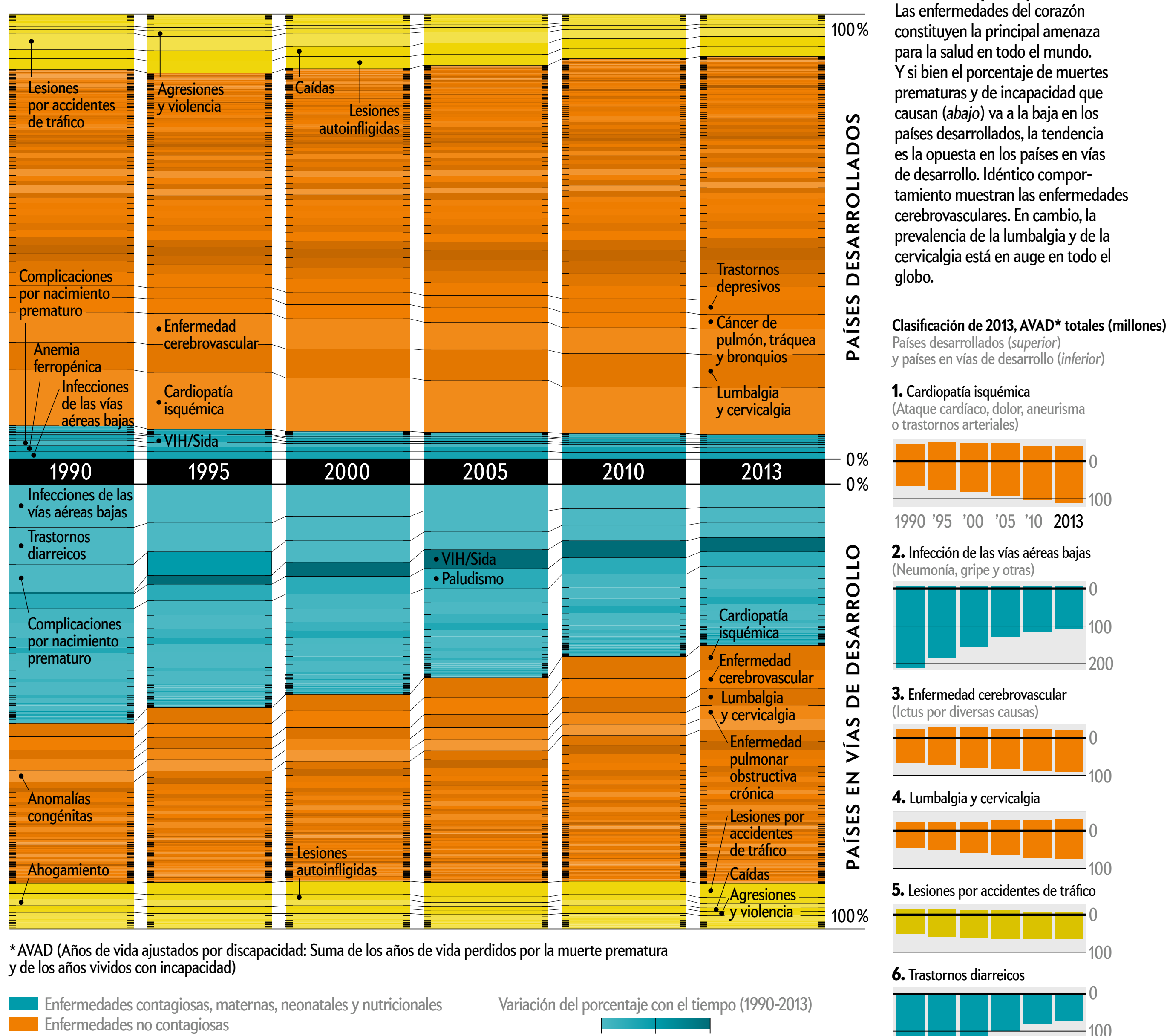
EPIDEMIOLOGÍA

Tendencia mundial de las enfermedades

Los países en vías de desarrollo luchan contra dolencias propias de países ricos y pobres

Hace décadas que la esperanza de vida aumenta en todo el planeta. Pero también lo hace el número de personas que viven más años con dolencias debilitantes. Eso asegura un nuevo estudio del Instituto para la Evaluación y Métrica de la Salud de EE.UU. Los problemas de salud que afectan a los países desarrollados (*mitad superior de la gráfica*) son provocados casi enteramente por enfermedades no contagiosas, como las cardiopatías, las neumopatías y las raquialgias (*naranja*), afecciones vinculadas con los hábitos alimentarios y el sedentarismo. Por su parte, los países en vías de desarrollo (*inferior*) ven aumentar con rapidez la prevalencia de ese tipo de dolencias sin que hayan podido atajar o erradicar enfermedades contagiosas que las afligen desde hace tiempo, como la diarrea y el paludismo (*azul*). Si estos países actúan con inteligencia, podrán crear programas de salud que conjuren las nuevas amenazas y palien las antiguas. «Si saben lo que va a venir, podrán priorizar lo que deben hacer», afirma Amy VanderZanden, miembro del instituto. *—Mark Fischetti*

Causas de muerte prematura e incapacidad, 1990-2013



*AVAD (Años de vida ajustados por discapacidad: Suma de los años de vida perdidos por la muerte prematura y de los años vividos con incapacidad)

ESPECTROSCOPÍA

Un nuevo microscopio de rayos X

Una prometedora técnica multiplica por cien la resolución temporal de los mejores dispositivos espectroscópicos actuales. Ello permitirá estudiar en tiempo real numerosos procesos moleculares hasta ahora inexplorados

ALEJANDRO TURPIN Y ANTONIO PICÓN

A lo largo del siglo xx, la humanidad ha desarrollado numerosas técnicas para observar la estructura interna de los materiales, desde la microscopía de superresolución y de fuerza atómica hasta los métodos de difracción, entre otras muchas. No obstante, estudiar procesos dinámicos a nivel molecular requiere emplear dispositivos que no solo logren una gran resolución espacial, sino que sean también capaces de interaccionar con el sistema en sus escalas de tiempo características, a fin de poder observar la evolución de los procesos moleculares en tiempo real. Es decir, necesitamos dispositivos ultrarrápidos.

Con ese propósito en mente, en los últimos años se han desarrollado varias técnicas que combinan un pulso láser seguido de uno de rayos X. El primero pone en marcha el proceso molecular objeto de estudio, mientras que el segundo llega al sistema cuando aún está evolucionando, lo que permite obtener información de su dinámica. Al regular la duración del intervalo que media entre ambos pulsos, pueden obtenerse «fotografías» de la estructura de la molécula en distintos instantes y componerlas para crear una película en tiempo real del proceso inducido por el láser.

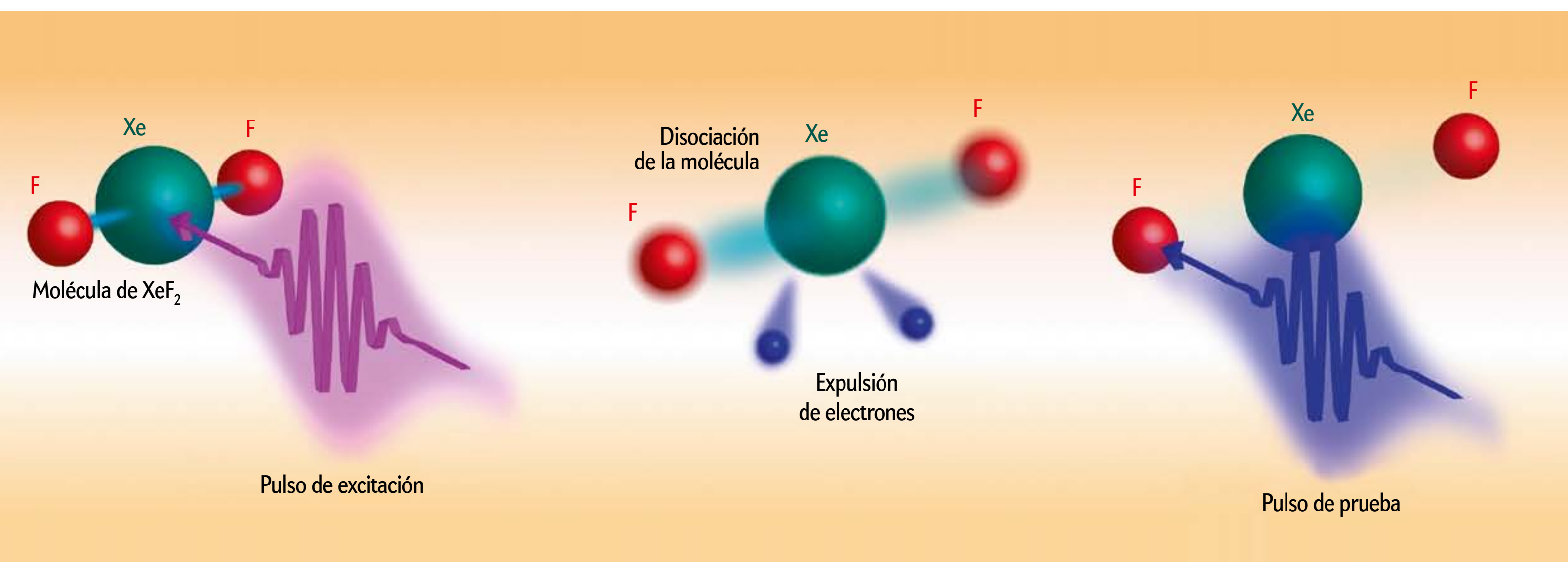
Hoy por hoy, sin embargo, la tecnología no permite que el pulso láser y el de rayos X queden separados por un intervalo de menos de un picosegundo (10^{-12} segundos). Ese umbral impide acceder a numerosos procesos moleculares fundamentales, muchos de los cuales se desarrollan en escalas de tiempo del orden del femtosegundo (10^{-15} segundos).

Hace poco, una colaboración liderada por uno de nosotros (Picón) ha desarrollado una nueva técnica que permite multiplicar por cien la resolución temporal de los dispositivos actuales. En lugar de emplear un pulso láser y uno de rayos X, el nuevo método usa dos pulsos de rayos X ultracortos y de diferente frecuencia, o «color». Gracias a esta técnica, descrita el pasado mes de mayo en *Nature Communications*, pronto podremos estudiar mecanismos moleculares de transferencia de energía y de electrones que, hasta ahora, resultaban imposibles de analizar.

Láseres de rayos X

Los rayos X son ondas electromagnéticas de muy alta energía, por lo que pueden penetrar en el interior de los materiales con mayor facilidad que el resto de la radiación. En general, suelen interaccionar con los electrones situados más cerca del núcleo atómico. Una de sus principales ventajas reside en que, mediante un control fino de su energía, podemos seleccionar qué electrones de qué núcleo vamos a excitar. Esta propiedad, conocida como «excitación selectiva», ofrece una ventana única para acceder a la estructura interna de las moléculas.

Las aplicaciones ultrarrápidas exigen un gran control en la generación de rayos X, ya que los pulsos han de ser muy breves, coherentes y muy intensos. Sin



VENTANA AL NANOMUNDO: Un nuevo método de espectroscopía de rayos X permite «filmar» procesos moleculares con una precisión de nanómetros y una resolución temporal de femtosegundos. La técnica se basa en el empleo de dos pulsos sucesivos de rayos X de distinta energía, o «color», de unos 10 femtosegundos de duración. El primero (*violeta*) desencadena el proceso molecular objeto de estudio. Unos cientos de attosegundos después, el segundo pulso (*azul*) llega al sistema cuando este aún está evolucionando, lo que permite medir sus propiedades y obtener información sobre su dinámica en tiempo real. La imagen ilustra la aplicación de la técnica al estudio de la disociación de la molécula de XeF_2.

CORTESÍA DE LOS AUTORES

embargo, la elevada energía de esta radiación hace que resulte muy difícil producirlos de forma controlada. De hecho, los métodos tradicionales para generar rayos X (como los empleados en los hospitales, los basados en la radiación de sincrotrón o los obtenidos con la técnica de generación de armónicos de orden alto) no permiten obtener pulsos con las características requeridas para las aplicaciones ultrarrápidas.

Para lograrlo deben emplearse láseres de electrones libres (XFEL, por sus siglas en inglés), los cuales son capaces de generar pulsos de rayos X coherentes, intensos y con una duración de femtosegundos. Para ello, un chorro de electrones que viaja a más del 99 por ciento de la velocidad de la luz se hace pasar por un ondulador, un dispositivo compuesto por imanes gigantescos con polaridades alternadas. Esa configuración induce en los electrones un movimiento de zigzag que los acelera en diferentes direcciones y, como consecuencia, les hace radiar pulsos de rayos X. En el caso que nos ocupa, la demostración de la nueva técnica fue llevada a cabo en el XFEL de la Fuente de Luz Coherente del Acelerador Lineal de Stanford, en California, uno de los centros de referencia mundial en la generación de rayos X.

Pulsos de colores

El nuevo método emplea dos pulsos de rayos X de diferente energía, cada uno de unos 10 femtosegundos de duración y separados por un intervalo de varios attosegundos (10^{-18} s). La diferencia fundamental con los métodos anteriores reside en que el pulso que pone en marcha los procesos moleculares es uno de rayos X, no uno de luz láser. Ello permite acceder de manera selectiva a la estructura interna de la molécula y estudiar numerosos procesos moleculares con una precisión inferior al nanómetro y con una resolución temporal de pocos femtosegundos.

Para generar los pulsos, el haz de electrones libres se hace pasar de manera consecutiva por dos onduladores cuyos campos magnéticos han sido ajustados para controlar la energía de los rayos X. El ingenio de la técnica reside, por un lado, en la energía de la pareja de rayos X, y, por otro, en la ajustada sincronización entre ambos pulsos.

Esto último se logra gracias a un método realmente intuitivo: después de pasar por el primer ondulador y generar un pulso de rayos X, los electrones siguen un circuito generado por una serie de bobinas, conocido como chicane magnética. Ello les hace tomar un camino ligeramente más largo antes de llegar al segundo ondulador, de manera que el segundo pulso de rayos X es emitido con un pequeño retraso con respecto al primero, el cual puede controlarse ajustando la disposición y la intensidad de la corriente que pasa por las bobinas.

Esta nueva técnica ultrarrápida se ha empleado para disociar la molécula de difluoruro de xenón (XeF_2) y observar la dinámica del proceso con una resolución temporal de hasta 4 femtosegundos. El primer pulso es absorbido en los electrones cercanos al núcleo de xenón. Poco después, el segundo pulso llega a uno de los átomos de flúor en el momento en que se está separando del átomo de xenón, con lo que puede monitorizarse la reacción.

Cuando los rayos X interaccionan con los electrones cercanos al núcleo, estos se desplazan hacia la capa de valencia o abandonan la molécula, dejando un «agujero» en una capa electrónica muy profunda. Ese hueco provoca una reacción colectiva entre los electrones cercanos, la cual también acaba afectando a los electrones de valencia. De esta manera, una excitación que comienza localizada desencadena una transferencia de electrones y de energía que se desarrolla en pocos femtosegundos. Entender de manera cuantitativa estos mecanismos ultrarrápidos, una cara hasta ahora oculta de las moléculas, resulta esencial en múltiples ámbitos de investigación. Por ello, aventuramos que esta nueva técnica marcará un antes y un después en el estudio de numerosos procesos fundamentales.

Un futuro brillante

En la actualidad ya se están construyendo varias instalaciones que, dentro de poco, podrán incorporar la espectroscopía de rayos X de dos colores. Entre ellas destacan el XFEL Europeo, en Hamburgo, cuya puesta en marcha está prevista para 2017, y el nuevo XFEL de Stanford, que se espera que comience a operar en 2019. Esta nueva generación de instrumentos permitirá ejercer un gran control sobre la energía, la duración y el grado de coherencia de los pulsos, lo que permitirá estudiar aspectos hasta ahora desconocidos de la materia. Entre ellos, la estructura tridimensional de biomoléculas y virus para el diseño de nuevos fármacos, estructuras nanométricas con importancia para aplicaciones tecnológicas, o los mecanismos de transferencia de carga implicados en moléculas fotosintéticas artificiales.

Por último, también se están realizando grandes esfuerzos para expandir los límites de la técnica de generación de armónicos de orden alto, a fin de adaptarla para la generación de pulsos ultracortos y poder así disponer de fuentes coherentes en un espacio no mayor que el que ocupa una mesa de laboratorio. En España son varios los grupos que ya trabajan en esta línea, como el equipo experimental de Jens Biegert, del Instituto de Ciencias Fotónicas en Castelldefels, donde ya se ha conseguido la generación de pulsos de rayos X blandos de pocos attosegundos de duración; así como varios grupos teóricos, como el de Fernando Martín, de la Universidad Autónoma de Madrid; Ángel Rubio, de la Universidad del País Vasco, o los grupos de óptica de la Universidad de Salamanca y el Centro de Láseres Pulsados (CLPU), en la misma ciudad. Creemos que, muy pronto, los nuevos avances en este campo nos permitirán arrojar luz sobre mundos hasta ahora desconocidos.

—Antonio Picón
Laboratorio Nacional Argonne, EE.UU.

—Alejandro Turpin
Universidad Autónoma de Barcelona

PARA SABER MÁS

Attosecond molecular dynamics: Fact or fiction? F. Lépine et al. en *Nature Photonincs*, vol. 8, págs. 195-204, febrero de 2014.
High-intensity double-pulse X-ray free-electron laser. A. Marinelli et al. en *Nature Communications*, vol. 6, art. n.º 6369, marzo de 2015.
Hetero-site-specific X-ray pump-probe spectroscopy for femtosecond intramolecular dynamics. A. Picón et al. en *Nature Communications*, vol. 7, art. n.º 11.652, mayo de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

La generación de rayos X ultrabrillantes. Massimo Altarelli, Fred Schlachter y Jane Cross en *IyC*, febrero de 1999.
Rayos X para escudriñar el nanocosmos. Gerhard Samulat en *IyC*, junio de 2012.
El láser de rayos X definitivo. Norah Berrah y Philip H. Bucksbaum en *IyC*, marzo de 2014.

COGNICIÓN

VIDEOJUEGOS QUE POTENCIAN EL CEREBRO

Disparar a zombis y repeler invasiones extraterrestres puede mejorar de forma duradera algunas facultades mentales

Daphne Bavelier y C. Shawn Green

EN SÍNTESIS

Los videojuegos de disparos y ritmo vertiginoso, no suelen aparecer en las listas de las actividades que desarrollan el cerebro. Durante los últimos quince años, sin embargo, se ha demostrado que su uso frecuente mejora algunos aspectos de la cognición.

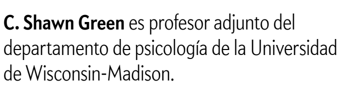
Ciertas facultades mentales parecen mejorar con los videojuegos; entre ellas, la atención, el procesamiento rápido de la información, la flexibilidad para cambiar de una tarea a otra y la rotación mental de un objeto. Estas mejoras se han demostrado con tests rigurosos.

Todavía preocupa que los videojuegos fomenten la agresividad y el juego adictivo. Tras determinar cómo ayudan a perfeccionar algunas habilidades mentales, se están empezando a diseñar juegos de acción no violentos dirigidos a personas con deficiencias cognitivas.

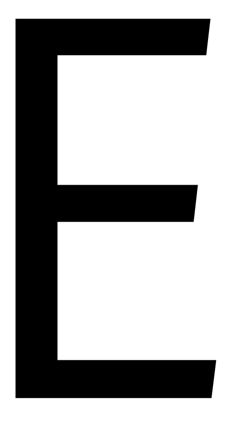

OS
JUDE BUFFUM



Daphne Bavelier es profesora del departamento de psicología y ciencias de la educación de la Universidad de Génova y del departamento del cerebro y ciencias cognitivas de la Universidad de Rochester.



C. Shawn Green es profesor adjunto del departamento de psicología de la Universidad de Wisconsin-Madison.



En los últimos años del siglo xx, nuestro laboratorio de la Universidad de Rochester estudiaba la idea, un tanto heterodoxa, de que el cerebro adulto podía generar nuevas neuronas o interconexiones en respuesta a nuevas experiencias; un proceso biológico denominado neuroplasticidad. Como parte de esta investigación, uno de nosotros (Green), quien por aquel entonces era un estudiante de carrera de 18 años de edad, escribió el programa informático de un test psicológico por ordenador. Su objetivo era evaluar la capacidad para buscar una forma determinada en una escena visualmente sobrecargada.

Green probó primero el test consigo mismo. Al terminar, insistía en que el programa informático debía contener un error que no podía encontrar. Según los estudios publicados sobre este tipo de tests, sus puntuaciones en la prueba tendrían que haber distado mucho de ser perfectas. Y, sin embargo, lo eran una y otra vez. A la supervisora de Green (Bavelier) le fue inquietando cada vez más que el problema no se resolviese. «¿Por qué no dejas de hacerte la prueba a ti mismo y aplicas el test a participantes nuevos?», le preguntó.

Unos días más tarde, Green le informaba de que los participantes que había enrolado también obtenían resultados perfectos. Determinada a solucionar el problema ese mismo día, Bavelier pidió someterse a la prueba ella misma. Su rendimiento no fue perfecto, todo lo contrario: la puntuación coincidió casi exactamente con la media esperada. Cuando Bavelier preguntó a Green a quiénes había escogido como participantes novicios, este le contestó que a unos muy buenos amigos suyos.

Nuestro grupo le dedicó un tiempo a pensar en la razón de que Green y sus amigos hubiesen superado tan bien la prueba. Al final dimos con una diferencia crucial: todos ellos habían dedicado más de diez horas semanales a jugar al videojuego *Team Fortress Classic*, que por entonces acababa de salir.

Ese descubrimiento planteó de inmediato una intrigante posibilidad: jugar a un videojuego cuyo objetivo principal es subyugar zombis, extraterrestres, monstruos y villanos sin tener que pensar mucho para ello, ¿podía realmente producir esas impresionantes mejoras cognitivas?

En nuestro trabajo hemos encontrado, al igual que otros grupos, que los videojuegos estimulan varias habilidades. Quienes juegan a videojuegos de acción de manera regular mejoran su capacidad de centrarse en los detalles visuales, lo que resulta útil para leer la letra pequeña de un documento legal o de un frasco de medicamentos. También aumenta la sensibilidad al contraste visual, que es importante cuando se conduce en medio de una niebla densa. Los jugadores de videojuegos de acción también rotan mentalmente los objetos de manera más precisa y calculan mejor la manera en la que un sofá de forma extraña puede encajar en un furgón de mudanzas demasiado lleno. También tienen una mayor capacidad multitarea, lo que les facilita ir alternando entre leer el menú de un restaurante y mantener una conversación con un compañero de mesa.

Más aun, el juego regular también mejora la capacidad de reaccionar ante eventos que ocurren con rapidez. El análisis de los tiempos de reacción de los jugadores muestra que su rendimiento mejora en más de un 10 por ciento con respecto a la época en que no eran aficionados a los videojuegos de acción. Tales juegos pueden también otorgar ventajas en el trabajo. Parecen conferir la habilidad de tomar decisiones correctas bajo presión, un tipo de talento que se busca en muchas profesiones. Un estudio reveló que los cirujanos laparoscópicos que jugaban a videojuegos eran capaces de realizar cirugías completas más deprisa sin menoscabar por ello la precisión que se necesita en un quirófano.

Que los videojuegos valgan como herramientas de aprendizaje puede resultar una sorpresa para quienes recuerden la comparecencia de expertos ante el Congreso de los Estados Unidos a principios de los años noventa para tratar los efectos negativos que sufrían los niños que jugaban juegos del estilo de *Mortal Kombat*. Los estudios recientes no han ratificado estos temores en la misma medida en que han confirmado los efectos en la función cognitiva, aunque persiste la preocupación de que promuevan la agresividad y el juego adictivo. Ahora que vamos entendiendo la manera en que algunos videojuegos desarrollan la cognición de los jugadores (mejorando la atención y los tiempos de respuesta), se están empezando a diseñar juegos no violentos dirigidos a personas con daños cerebrales o deficiencias cognitivas. Estos programas informáticos pueden ser más efectivos que los llamados «juegos mentales» que se venden como potenciadores cognitivos [*véase* «Entrenamiento cerebral: una farsa intelectual», por Sonia Lorant-Royer y Alain Lieury; Mente y Cerebro n.º 42, 2010].

LA ESTIMULACIÓN DEL CEREBRO

Según el tópico, el jugador ávido de *Call of Duty* y de otros juegos de acción es alguien impulsivo que se distrae fácilmente. Nuestros estudios contradicen este obsoleto prejuicio.

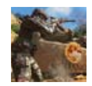
Gran parte de nuestra investigación se ha centrado en la manera en que los juegos de acción afectan a la atención (el

Variedad de videojuegos

Los videojuegos pertenecen a un complejo ecosistema que está continuamente evolucionando, con más de diez géneros diferentes comúnmente reconocidos (de acción, simulación de deportes, fiesta, etcétera). Entre estos, existen cientos de subgéneros (los juegos de estrategia en tiempo real, de estrategia por turnos y de construcción de imperios o 4X están incluidos en el género de juegos de estrategia). Hay, además, decenas de miles de títulos entre las distintas categorías.

En cuanto al estudio de los efectos sobre la cognición, la mayor parte de las investigaciones se han centrado en un género particular: los videojuegos de acción. Estos incluyen principalmente juegos de disparos en primera y tercera persona (como *Call of Duty* o la serie de *Gears of War*), así como juegos que generalmente se etiquetan como de acción y aventura (*Grand Theft Auto*), acción (*Burnout*) y juegos de rol de acción (*Mass Effect*), por nombrar solo unos pocos.

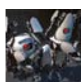
Aunque, en comparación con otros géneros, los juegos de acción son los más apropiados para mejorar la percepción, la atención o varios aspectos cognitivos, no son los únicos que ofrecen beneficios más allá del pasatiempo, tal y como se muestra en la lista que reproducimos abajo. La investigación sobre juegos de deportes de acción, de estrategia en tiempo real y de rol de acción indica que estos también tienen un impacto similar a los juegos de acción en la mejora de algunos aspectos cognitivos. Es más, los géneros que no afectan a la cognición pueden mejorar la empatía o algunos comportamientos sociales. Los investigadores que estudian los juegos sociales tienden a categorizar los distintos juegos de modo diferente a como lo hacen quienes investigan la cognición; en ocasiones, dividen los juegos entre violentos y no violentos.



JUEGOS DE ACCIÓN: La mayor parte de la investigación sobre los juegos que potencian la cognición se ha centrado en los juegos de acción, un género que tiene subgéneros como los juegos de disparos y de acción-aventura. Se ha demostrado que los juegos de acción proporcionan beneficios cognitivos que pueden extenderse al ámbito laboral y a otras actividades.



JUEGOS DE ESTRATEGIA EN TIEMPO REAL: Jugar a uno de estos juegos, el llamado *StarCraft* —con un argumento de ciencia ficción militar en el que tiene lugar una guerra entre varias especies galácticas—, da lugar a mejoras en la flexibilidad cognitiva (la habilidad para cambiar de una tarea a otra).



ROMPECABEZAS TRIDIMENSIONALES: Tras jugar a encontrar una puerta de salida usando una serie de herramientas, objetivo de *Portal 2*, los jugadores puntuaron mejor en tareas de resolución de problemas, habilidad espacial y persistencia que aquellos que practicaron los juegos de entrenamiento mental incluidos en el programa *Lumosity*.



PROSOCIALES: Un artículo de revisión publicado en la revista *Personality and Social Psychology Bulletin* mostró que, después de jugar a juegos «prosociales», en los que distintos personajes se ayudan mutuamente, jóvenes de varias nacionalidades cooperaban más cuando tenían que interaccionar con sus compañeros.

proceso mental que permite encontrar en el entorno información relevante). La atención se estudia desde que la psicología surgió como ciencia social en el siglo XIX. *Call of Duty* y *Medal of Honor* se han convertido en herramientas de investigación por su capacidad para aumentar la atención. Un jugador debe mantener la mente enfocada y, al mismo tiempo, vigilar la escena del juego para descubrir potenciales enemigos, lo que le obliga a cambiar a propósito entre las formas de atención que los psicólogos denominan «focalizada» y «repartida».

Estos estudios han demostrado que combatir oleadas de zombis requiere que los jugadores supriman la información distractora para no ser aniquilados. Más concretamente, los jugadores habituales detectan objetivos mejor que quienes no lo son, y evitan distraerse con un solo suceso de todos los que tienen lugar mientras el juego progresa con rapidez. A un zombi siempre lo seguirá otro, y a este, otro. El jugador que se queda atascado en la persecución de un solo muerto viviente se arriesga a ser atacado por legiones de otros.

En uno de nuestros estudios usamos un conocido test psicológico para poner de relieve las facultades de atención superiores que caracterizan a quienes juegan a este tipo de videojuegos. Dicho test consiste en mostrar a los sujetos una serie de letras, entre las que se intercalan ocasionalmente números. Cada elemento se muestra en la pantalla a intervalos de 100 milisegundos, más cortos que el parpadeo de un ojo. Quienes no juegan a estos videojuegos tienen por lo general poca dificultad para identificar el primer dígito. Pero, si aparece un segundo número poco después, a menudo no lo notarán debido a un fenómeno psicológico conocido como parpadeo atencional. Algunos experimentados jugadores de juegos de acción, sin embargo, apenas parpadean y cazan cada número en cuanto aparece.

Los escáneres cerebrales aportan más pruebas de los efectos beneficiosos de los juegos de acción. La actividad de regiones muy dispersas de la corteza cerebral cambia más en los jugadores de juegos de acción que en los de otro tipo de juegos. Entre estas regiones se encuentran la corteza dorsolateral prefrontal, que interviene en el mantenimiento de la atención; el lóbulo parietal, que redirige la atención entre diferentes objetivos; y el giro cingulado, que vigila el comportamiento de uno mismo.

MÁS RÁPIDO, MÁS RÁPIDO

Con *Burnout* y *Grand Theft Auto*, los jugadores hacen algo más que mejorar su focalización. Cuanto mejor juegan, procesan con mayor rapidez la información contenida en el rápido flujo de eventos de cada una de sus escenas. Para los psicólogos, la velocidad en el procesamiento de la información es una medida esencial de la eficiencia del funcionamiento cognitivo, y los juegos de acción parecen ser herramientas excelentes para que el tiempo de reacción de una persona sea más corto. El jugador debe decidir si un objeto que se mueve es un amigo o un enemigo y elegir qué arma usar, adónde apuntar y cuándo disparar, todo ello en alrededor de un segundo.

La mayor eficiencia en el control de la atención se extiende a muchas formas de procesamiento neural. Puede lograr que

el cerebro extraiga más información visual, auditiva o de otros tipos relativa a una tarea que se está realizando (y que excluya fuentes de distracción o ruido). En los niveles más altos de procesamiento, un individuo mostrará quizás una gran flexibilidad al reorientar la atención de una tarea a otra. No se trata solo de resultados de laboratorio. Un mayor control de la atención ayuda a adaptarse a nuevas situaciones y contribuye, en general, a agilizar el aprendizaje.

Para establecer claramente los efectos de estos juegos, tuvimos que aportar una demostración firme de que los beneficios eran genuinos y de que jugar a ellos era realmente la causa de una concentración y rapidez de reacción superiores. Después de todo, podría ser que estos juegos simplemente atrajesen a jugadores con una capacidad de atención excepcional.

Para demostrar una verdadera relación de causa y efecto, se recluta a un grupo de individuos que rara vez juegan a videojuegos. Tras pasar un test previo de facultades cognitivas, el grupo se divide en dos. Un subgrupo juega a juegos de acción, mientras que el subgrupo de control se sumerge en un juego social o de otro tipo que no sea de acción. Cada subgrupo tiene que jugar una hora al día, cinco días a la semana, durante varias semanas. Unos días después de este entrenamiento prolongado, los participantes realizan de nuevo los mismos tests psicológicos que midieron sus facultades cognitivas antes de empezar. Los grupos entrenados en juegos de acción muestran con regularidad mejorías más acusadas en sus capacidades cognitivas que los grupos de control.

Los estudios controlados permiten descartar factores que, de otro modo, podrían explicar el provecho obtenido por un grupo o por el otro. Por ejemplo, existe la posibilidad de que alguien que lleva a cabo un test psicológico tienda a obtener mejores resultados cuando lo repite. Estos estudios también demuestran que no todos los videojuegos tienen los mismos efectos. Los juegos de acción que fomentan la atención, la flexibilidad cognitiva y la velocidad producen claros beneficios. No ocurre lo mismo con los juegos que no son de acción y que no requieren estos procesos cognitivos. Con todo, estos estudios no dan licencia para darse un atracón de videojuegos: no hace falta jugar obsesivamente hora tras hora, las ventajas cognitivas se consiguen con cortas sesiones de juego diarias.

Otros géneros de videojuegos, como los de rol (*Mass Effect*) y los de estrategia en tiempo real (*StarCraft*), también producen beneficios similares en la cognición. Irónicamente, pocos —puede que ninguno— de los juegos comercializados como «juegos para el cerebro» ayudan realmente a las personas con déficits cognitivos o a quienes desean mejorar sus facultades mentales por encima de los niveles promedio. Las primeras generaciones de esos juegos consistían en gran medida en estériles tareas psicológicas de laboratorio maquilladas con imágenes de juegos o con sonidos contagiosos, y no demostraban ningún beneficio cognitivo generalizable. Es improbable que llegar a ser mucho mejor en un ejercicio psicológico específico ayude a planificar una ruta eficiente en el supermercado o a recordar dónde se han dejado las llaves del coche.

Aunque los videojuegos de acción no fueron diseñados como herramientas educativas, incorporan numerosos principios educativos fundamentales. Para empezar, son divertidos; un requisito pedagógico cardinal al que a menudo no se le presta la atención que merece.

La programación del juego también incorpora un ritmo y una estructura cuidadosamente pensados para el nivel de juego. El número de atacantes aumenta según se progresa. Los jugadores se mantienen absortos mientras van acumulando la práctica necesaria para dominar una destreza que necesitan. Un aspecto clave es que, conforme la partida avanza, los jugadores tienen que alternar entre las tareas que requieren atención focalizada y las que obligan a una atención dividida, lo que precisa un alto nivel de control atencional.

Los juegos crean un entorno complejo en el que no dejan de aparecer nuevas dificultades que empujan sin cesar al jugador fuera de su zona de confort. Por último, los juegos también premian a los jugadores en escalas temporales diferentes: segundos (derrotar a un solo enemigo), minutos (terminar una misión), horas (terminar un capítulo o una campaña), días (completar el juego en su totalidad). Todo ello fomenta la planificación a través de diferentes horizontes temporales. Los juegos son una experiencia gratificante que promueve un aprendizaje aplicable a situaciones de la vida real: mejorar la rotación mental de objetos en las clases de ciencias o matemáticas, o frenar rápidamente el coche cuando un niño aparece para alcanzar la pelota.

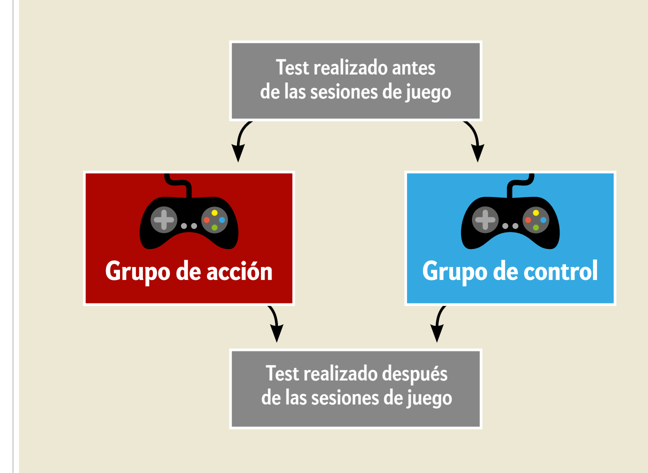
UN VERDADERO JUEGO PARA EL CEREBRO

Los investigadores estamos empezando a aprender del estudio de los videojuegos comerciales y a aplicar ese conocimiento a una nueva generación de juegos terapéuticos que guardan poco parecido con los monótonos tests psicológicos. Posit Science, Pear Therapeutics y Akili Interactive (Bavelier es cofundadora y asesora de Akili) son algunas de las cada vez más numerosas compañías que estudian el uso de videojuegos como herramientas clínicas, ya sea para la valoración o para la terapia propiamente dicha. Akili, por ejemplo, está desarrollando un juego terapéutico (derivado de un juego basado en investigaciones

TESTS

¿Entrenamiento cerebral o no?

Para determinar si son los juegos de acción en sí los que mejoran la percepción y otros aspectos de la cognición, se compara el rendimiento en pruebas cognitivas de un grupo que juega con videojuegos de acción durante varias semanas y el de uno de control que se entrena en juegos que no son de acción. Comparados con el grupo de control, los jugadores de los juegos de acción obtienen mejorías más acusadas entre la prueba anterior y la posterior al juego. Esos beneficios persisten a los cinco meses.



FUENTE: «BRAIN PLASTICITY THROUGH THE LIFE SPAN: LEARNING TO LEARN AND ACTION VIDEO GAMES», POR DAPHNE BAVELIER ET AL., EN *ANNUAL REVIEW OF NEUROSCIENCE*, VOL. 35; JULIO DE 2012; JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

¿Puedes verlo?
Una tarea que requiere sensibilidad al contraste mide la capacidad de detectar ligeras diferencias de luminosidad en una pantalla de ordenador. Hay que observar una pantalla en dos intervalos de tiempo e indicar cuándo aparece un patrón de Gabor (una alternancia de líneas oscuras y claras). Se usan patrones con distintos grados de contraste para determinar el contraste mínimo que el participante es capaz de detectar.

Tiempo → Intervalo 1 — Filtro de Gabor — Intervalo 2
Destello de 30 milisegundos — Destello de 30 ms

Mejora en la sensibilidad (escala en unidades logarítmicas)
2 días después
5 meses después
Acción
Control
← Peor | Mejor →
0,1 0,2

Encuéntralo rápido
Una prueba llamada «del campo visual útil» mide la atención espacial, o la habilidad para encontrar deprisa un objetivo, mientras se ignoran los elementos distractores en una escena abarrotada y presentada brevemente. Los participantes deben encontrar un cuadrado relleno (el objetivo) e indicar donde se localiza.

Tiempo → Estímulo — Objetivo — Máscara — *Seleccione la localización del objetivo*
600 ms — Destello de 30 ms — 600 ms

Mejora en la búsqueda (en porcentaje de aciertos)
2 días después
5 meses después
0 10 20

Dale vueltas en la cabeza
Una prueba de rotación mental examina la capacidad para la visualización espacial de los jugadores pidiéndoles que determinen cuál de los tres objetos rotados corresponde al «objeto 1».

Objeto 1 — *Seleccione el panel que muestra una visión rotada del objeto 1*

Mejora en la rotación*
2 días después
5 meses después
0 1 2

**La escala muestra la raíz cuadrada del número de aciertos*

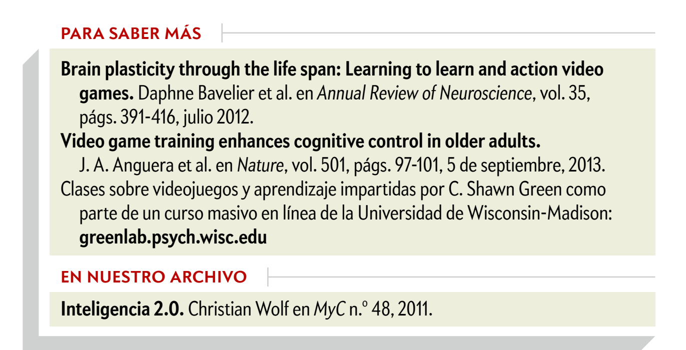
científicas llamado *NeuroRacer*) para aumentar la atención y disminuir la distracción. Este y otros juegos están dirigidos a diversas poblaciones: niños con trastornos de déficit de atención o adultos entrados en años que experimentan los primeros síntomas de deterioro cognitivo. Hará falta tiempo para que estos juegos sean aceptados. Los juegos terapéuticos tendrán que ser evaluados por los organismos reguladores o ser reconocidos por una parte amplia de la comunidad científica.

Aunque los juegos de acción sientan una base para el desarrollo de juegos terapéuticos, hay ciertos puntos débiles que deben corregirse. Primero, hay que adaptar los juegos a las necesidades del paciente. Muchos individuos con déficits de atención apenas mejoran con los juegos de acción comunes y corrientes, mientras que la atención de los individuos sanos sí se beneficia de ellos. La mayor parte de los jugadores se sirve de un modelo mental de cómo van a desarrollarse los acontecimientos, lo que les ayuda a anticipar lo que sucederá a continuación. Las personas con déficits de atención, sin embargo, muestran un estilo más reactivo en el juego y, por tanto, tienen dificultades en visualizar lo que va a pasar. Los creadores de juegos están tratando de encontrar la manera de reestructurar el formato tradicional de los juegos de acción para motivar a los jugadores que padecen déficit de atención, de modo que tomen un papel más activo y planeen sus siguientes jugadas.

Los juegos cuyo objetivo sea disminuir los tiempos de reacción en gente mayor, para, por ejemplo, mejorar la conducción, también necesitarán reformas parecidas. El ritmo frenético de la mayoría de los juegos de acción puede ser abrumador para los mayores. Los juegos adaptados requerirán un ritmo más moderado, de modo que supongan un reto, pero asequible.

También será necesario rebajar el nivel de exigencia de los juegos diseñados para mejorar la visión en casos de ambliopía (ojo vago), otro grupo al que se dirigen los creadores de juegos. La naturaleza violenta de muchos videojuegos deberá reducirse en los juegos pensados para actuaciones clínicas.

Aún hay posibilidades por explorar. Los juegos desarrollados expresamente para niños disléxicos o para pacientes con traumatismo craneoencefálico podrían personalizarse aún más mediante el uso de sensores que monitoricen las ondas cerebrales, lo que permitiría ajustar el nivel de juego automáticamente. Tan importante como la tecnología será el cuidado que pongamos en adaptar el juego a las fortalezas y debilidades cognitivas de sus jugadores. La adecuación a las necesidades particulares de los distintos grupos desempeñará un papel clave en la próxima generación de videojuegos.



PARA SABER MÁS

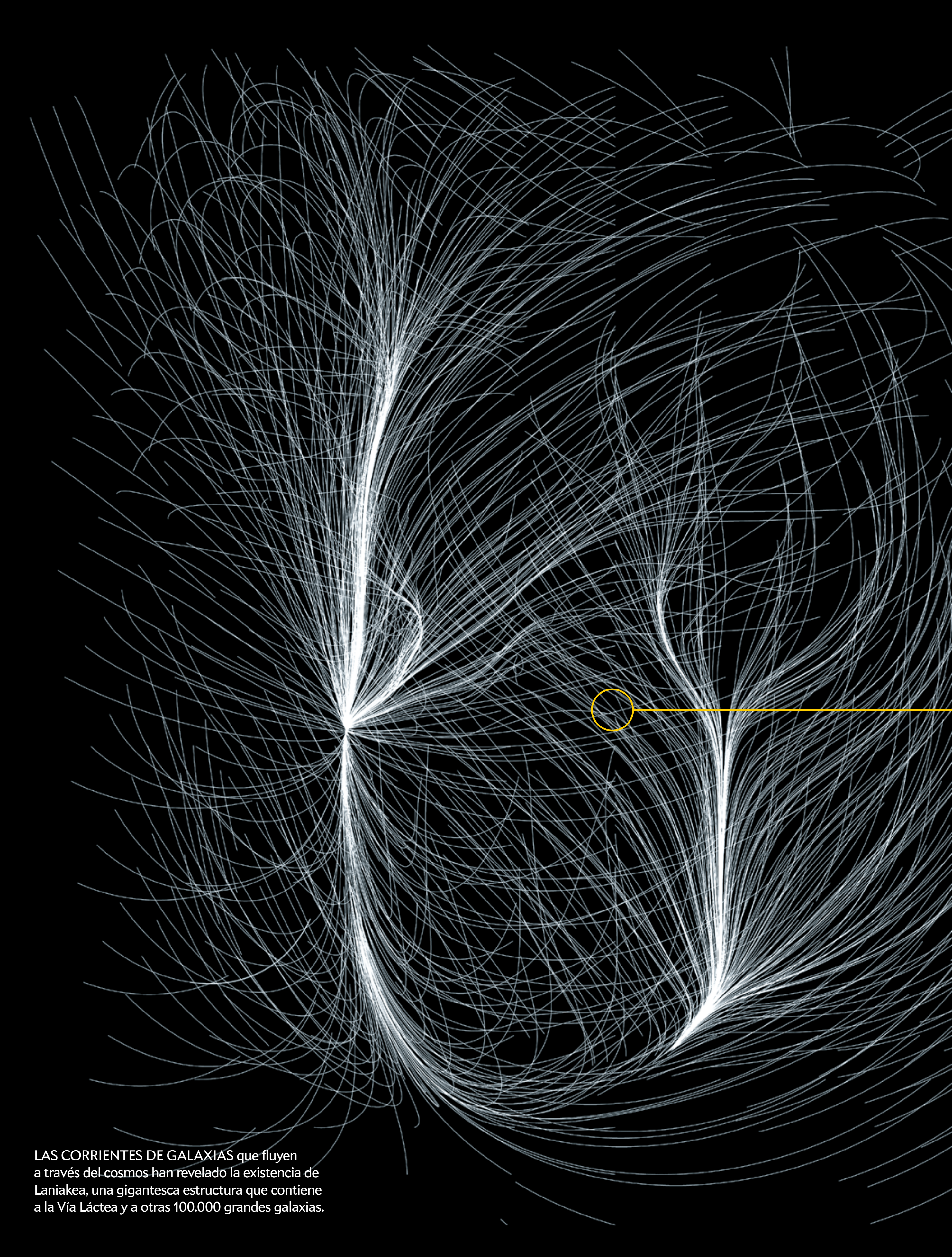
Brain plasticity through the life span: Learning to learn and action video games. Daphne Bavelier et al. en *Annual Review of Neuroscience*, vol. 35, págs. 391-416, julio 2012.

Video game training enhances cognitive control in older adults. J. A. Anguera et al. en *Nature*, vol. 501, págs. 97-101, 5 de septiembre, 2013.

Clases sobre videojuegos y aprendizaje impartidas por C. Shawn Green como parte de un curso masivo en línea de la Universidad de Wisconsin-Madison: **greenlab.psych.wisc.edu**

EN NUESTRO ARCHIVO

Inteligencia 2.0. Christian Wolf en *MyC* n.º 48, 2011.



LAS CORRIENTES DE GALAXIAS que fluyen a través del cosmos han revelado la existencia de Laniakea, una gigantesca estructura que contiene a la Vía Láctea y a otras 100.000 grandes galaxias.



Nuestro lugar en el cosmos

La Vía Láctea ha resultado ser parte de Laniakea, una descomunal agrupación de galaxias que conforma una de las mayores estructuras conocidas del universo. El hallazgo marca el comienzo de un nuevo intento de cartografiar el cosmos

Noam I. Libeskind y R. Brent Tully

USTED ESTÁ AQUÍ

EN SÍNTESIS

Al igual que las estrellas se agrupan en cúmulos estelares y en galaxias, las galaxias mismas se aglomeran en cúmulos galácticos, y estos, en supercúmulos.

Los supercúmulos de galaxias son los componentes básicos de los grandes filamentos, láminas y vacíos cósmicos que constituyen las mayores estructuras del universo.

Varios cartografiados recientes del movimiento de galaxias cercanas han revelado que el supercúmulo en el que reside la Vía Láctea es parte de una estructura mucho mayor.

Dicha superestructura ha sido bautizada como Laniakea. Su estudio ayudará a entender mejor la evolución de las galaxias, así como la materia y la energía oscuras.

Noam I. Libeskind es cosmólogo del Instituto Leibniz de Astrofísica de Potsdam. Emplea superordenadores para modelizar la evolución del universo y la formación de galaxias; en particular, la Vía Láctea, las del Grupo Local y las pequeñas galaxias enanas que nos rodean.

R. Brent Tully es astrónomo de la Universidad de Hawái. Desde hace 40 años, sus investigaciones se han centrado en medir la distancia a las galaxias y en cartografiar su distribución y movimientos en el espacio. Su *Atlas de galaxias cercanas*, escrito junto con Richard J. Fisher y publicado en 1987, sigue siendo el atlas impreso más exhaustivo de nuestro vecindario cósmico.

IMAGINE QUE, TRAS LLEGAR A UNA GALAXIA MUY LEJANA, DESEA ENVIAR UNA POSTAL A SUS SERES QUERIDOS. En la dirección podría comenzar indicando su calle y número de casa, su ciudad, el lugar de la Tierra en que esta se encuentra y que el planeta es el tercero del sistema solar. A partir de ahí, podría detallar la ubicación del Sol en el brazo de Orión, un segmento de un brazo espiral en las afueras de la Vía Láctea, y después la ubicación de la Vía Láctea en el Grupo Local, un conjunto de más de 50 galaxias que abarcan unos 7 millones de años luz. El Grupo Local se halla a su vez en la periferia del cúmulo de Virgo, una agrupación de más de mil galaxias cuyo centro se halla a 50 millones de años luz y que constituye una pequeña parte del Supercúmulo Local, una colección de cientos de grupos de galaxias esparcidos en más de 100 millones de años luz. Se cree que estos supercúmulos son los componentes principales de las mayores estructuras del universo, las cuales forman grandes filamentos y láminas de galaxias, situados en torno a inmensos vacíos cósmicos en los que las galaxias apenas existen.

Hasta hace poco, el Supercúmulo Local habría marcado el final de nuestra dirección cósmica. Se pensaba que, más allá, las indicaciones dejarían de tener sentido, pues los bordes entre esas gigantescas estructuras galácticas y los vacíos cósmicos darían paso a un universo homogéneo, sin rasgos distintivos a escalas mayores.

En 2014, sin embargo, un equipo liderado por uno de nosotros (Tully) descubrió que formamos parte de una estructura tan inmensa que hizo añicos esta idea. En realidad, el Supercúmulo Local no es más que un lóbulo de una estructura mucho mayor: una colección de unas 100.000 grandes galaxias que se extiende unos 400 millones de años luz. El equipo que la descubrió la bautizó como Laniakea, «cielo inconmensurable» en hawaiano, en honor de los antiguos polinesios que surcaron el Pacífico usando las estrellas como guía. La Vía Láctea se encuentra muy lejos del centro de Laniakea, en una de sus zonas más exteriores.

Laniakea es algo más que otra línea que añadir a nuestra dirección cósmica. El estudio de su arquitectura y de su dinámica nos permitirá aprender más sobre el pasado y el futuro del universo. Un mapa que refleje sus galaxias constituyentes y que indique cómo se comportan puede ayudarnos a entender mejor cómo nacen y crecen las galaxias. Y también darnos más información sobre la naturaleza de la materia oscura, la sustancia invisible que, según se cree, da cuenta de cerca del 80 por ciento de la masa del universo.

Laniakea también podría ayudar a desmitificar la energía oscura, una poderosa fuerza descubierta en 1998 y que, de algún modo, parece estar provocando que el universo se expanda cada vez más rápido, lo que sellará el destino final del cosmos [*véase* «El rompecabezas de la energía oscura», por Adam G. Riess y Mario Livio; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2016]. Y tal vez Laniakea no sea la última línea de nuestra dirección cósmica: podría ser parte de una estructura mayor aún por descubrir.

FLUJOS GALÁCTICOS

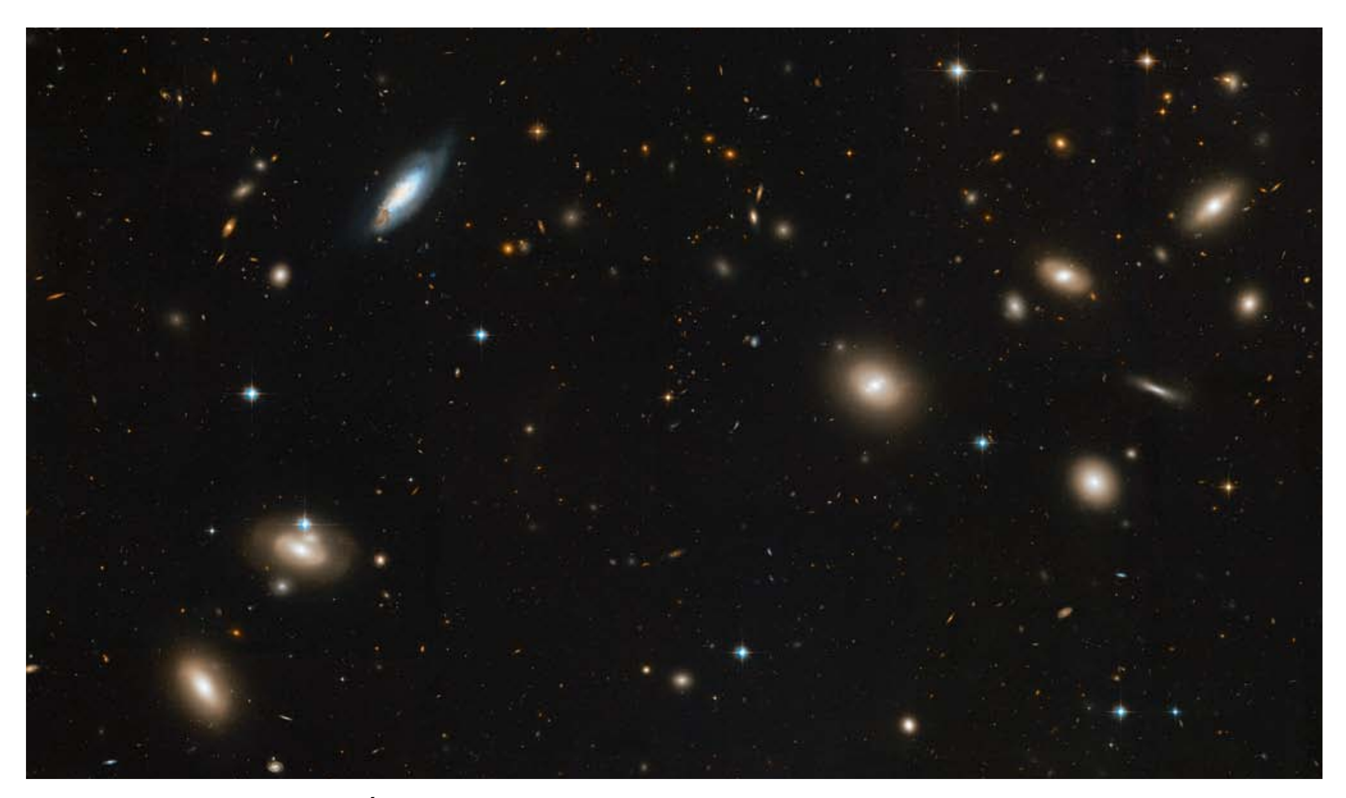
El equipo que descubrió Laniakea no se había propuesto encontrarla. Antes bien, el hallazgo fue fruto de un intento por responder a algunas preguntas fundamentales sobre la naturaleza del universo.

Hace casi un siglo que sabemos que el cosmos se está expandiendo: las galaxias se alejan unas de otras como si fueran puntos en la superficie de un globo que se hincha. Sin embargo, en los últimos decenios ha quedado claro que la mayoría de las galaxias no se apartan tan rápido como cabría esperar si la expansión cósmica fuera lo único que actúa sobre ellas. En su movimiento interviene también otro efecto: el tirón gravitatorio que ejerce la materia cercana, el cual puede compensar el desplazamiento de una galaxia inducido por la expansión del universo. La parte de la velocidad de una galaxia debida a su entorno local (es decir, la componente que no se explica por la expansión cósmica) recibe el nombre de «velocidad peculiar».

Si consideramos todas las estrellas que hay en todas las galaxias que vemos, y añadimos el gas y demás materia ordinaria que conocemos, nos quedamos cortos en un orden de magnitud a la hora de explicar las fuentes gravitatorias responsables de las velocidades peculiares observadas. En nuestra ignorancia, los astrónomos llamamos «materia oscura» a esa masa que falta. Suponemos que esta misteriosa sustancia se encuentra formada por partículas que interaccionan con el resto del universo casi exclusivamente a través de la gravedad (y no a través de otras fuerzas, como el electromagnetismo) y que es ella la que ejerce la atracción gravitatoria «que falta» para explicar las velocidades observadas. Se cree que las galaxias se hallan inmersas en gigantescas nubes de materia oscura, la cual constituiría el andamiaje invisible en torno al cual se aglomeran las galaxias.

El grupo de Tully y otros se percataron de que trazar mapas cósmicos del flujo de las galaxias y de sus velocidades peculiares

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DE DANIEL POMARÈDE, CEA SACLAY/IRFU



LOS CÚMULOS DE GALAXIAS son los componentes básicos de las mayores estructuras del universo. El cúmulo de Coma (*en la imagen*), compuesto por unas mil grandes galaxias y situado a unos 300 millones de años luz, forma parte de una estructura aún mayor, el supercúmulo de Coma, situado más allá de los límites de Laniakea.

CORTESÍA DE NASA, ESA, HUBBLE, STScI/AURA

ayudaría a inferir la distribución de materia oscura en el universo, lo que permitiría ubicar las mayores concentraciones de esta sustancia a partir de su influencia gravitatoria en el movimiento de las galaxias. Si, pongamos por caso, observamos que una corriente de galaxias se dirige hacia una región determinada, cabría deducir que están siendo atraídas por una agrupación muy densa de materia.

Además, determinar la densidad y la distribución de todas las formas de materia del universo podría arrojar luz sobre otro misterio aún más profundo: el hecho de que el cosmos no solo se expande, sino que lo hace cada vez más rápido. Este fenómeno resulta tan antiintuitivo como una piedra que, lanzada al aire, siguiera surcando el cielo en lugar de caer de nuevo a tierra. El agente causante de este extraño comportamiento se conoce como «energía oscura» y tiene profundas implicaciones para el futuro del universo.

La expansión acelerada parece indicar que el cosmos acabará experimentando una muerte fría: la mayoría de las galaxias se alejarán unas de otras a velocidades cada vez mayores, hasta que todas las estrellas de todas las galaxias mueran y la materia se enfríe hasta el cero absoluto. Pero saber cómo terminará todo no solo requiere determinar qué es exactamente la energía oscura, sino también cuánta materia hay en el universo. Si la densidad de materia es lo suficientemente elevada, en un futuro lejano el cosmos podría revertir su expansión y comenzar a contraerse sobre sí mismo. Por otro lado, una densidad equilibrada de materia podría conducir a una expansión ilimitada pero cada vez más lenta.

Fue este estudio de los movimientos galácticos, concebido para elaborar un mapa de la densidad de materia ordinaria y materia oscura, el que condujo al hallazgo de Laniakea.

EL DESCUBRIMIENTO DE LANIAKEA

Cartografiar el flujo de las galaxias requiere conocer tanto la componente de su movimiento debida a la expansión cósmica como la causada por la materia cercana. Para ello, los astrónomos comienzan midiendo el desplazamiento al rojo de las galaxias: cuánto se «estira» su luz a medida que se separan de nosotros. Cuando un silbato se acerca, su tono se torna más agudo que cuando se aleja, ya que las ondas sonoras se comprimen hacia longitudes de onda más cortas. De manera similar, las ondas luminosas procedentes de una galaxia que se aleja adquieren una longitud de onda mayor, o «más roja». Y, cuanto más rápido se separa una galaxia, mayor es su desplazamiento al rojo. Así pues, esta cantidad permite estimar la velocidad total de la galaxia y deducir de manera aproximada la distancia a la que se encuentra.

Hecho esto, podemos inferir qué parte de esa velocidad se debe a la atracción gravitatoria de la materia cercana. Para ello, hemos de medir la distancia a la galaxia con otras técnicas distintas del desplazamiento al rojo. Por ejemplo, a partir de estimaciones rigurosas, sabemos que una galaxia que se encuentre a 3,25 millones de años luz debería alejarse con una velocidad de unos 70 kilómetros por segundo como consecuencia de la expansión cósmica. Si, en vez de eso, su desplazamiento al rojo revela una velocidad de 60 kilómetros por segundo, podemos deducir que la materia cercana está confiriendo a la galaxia una velocidad peculiar de 10 kilómetros por segundo.

Las técnicas empleadas para estimar distancias con independencia del desplazamiento al rojo se basan, principalmente, en el hecho de que la intensidad de la luz disminuye con el cuadrado de la distancia. Es decir, si vemos dos faros idénticos pero uno de

Continúa en la página 30

Paisaje cósmico

A pesar de que contienen cientos de miles de millones de estrellas, las galaxias no son las mayores estructuras del universo. Ligadas por la gravedad, cientos de ellas pueden agruparse en cúmulos de galaxias, y estos, en supercúmulos. En esta jerarquía, la ubicación tradicional del sistema solar ha sido: Vía Láctea, Grupo Local, cúmulo de Virgo y Supercúmulo Local. Nuevas investigaciones han revelado que este último forma parte una superestructura cien veces mayor: Laniakea, cuyo nombre significa «cielo inconmensurable» en hawaiano.

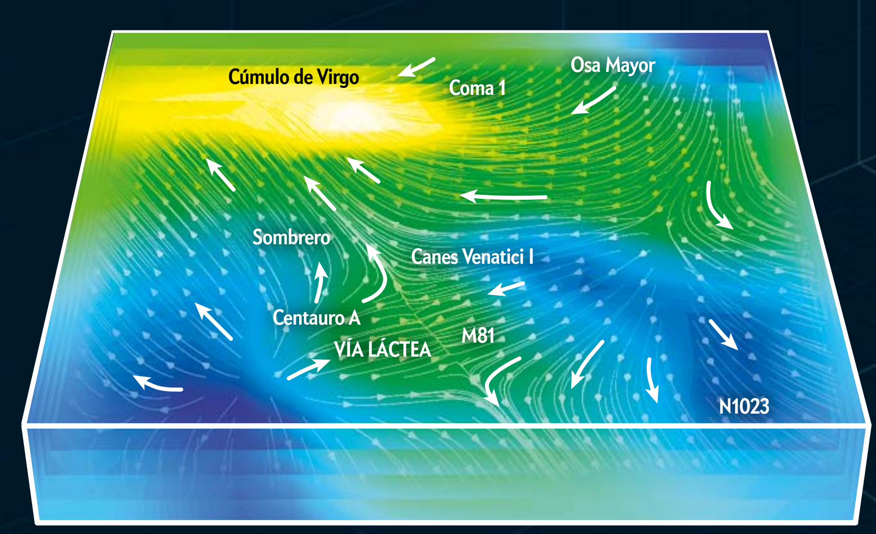
LANIAKEA

Consideradas en conjunto, las galaxias pueden separarse como consecuencia de la expansión cósmica o juntarse debido a la gravedad. Los límites de los supercúmulos pueden trazarse allí donde la fuerza convergente de la gravedad comienza a obstaculizar de manera significativa el movimiento divergente causado por la expansión. Aquí se indican las posiciones de más de 8000 galaxias, coloreadas según sus movimientos relativos (su velocidad y trayectoria cuando tenemos en cuenta tanto el movimiento convergente como el divergente).
Los contornos con colores cálidos (*amarillos y rosas*) representan cúmulos de galaxias que se están juntando con rapidez. La silueta de Laniakea aparece en un azul más frío, que define los lugares donde los cúmulos se aproximan de manera más lenta. Con una extensión de casi 500 millones de años luz, Laniakea comprende un volumen de cúmulos de galaxias que, en ausencia de expansión cósmica, se juntarían hasta convertirse en una única estructura unida por la gravedad. Más allá de los límites de Laniakea pueden verse otros supercúmulos vecinos, como el de Shapley, Hércules y Perseo-Piscis.

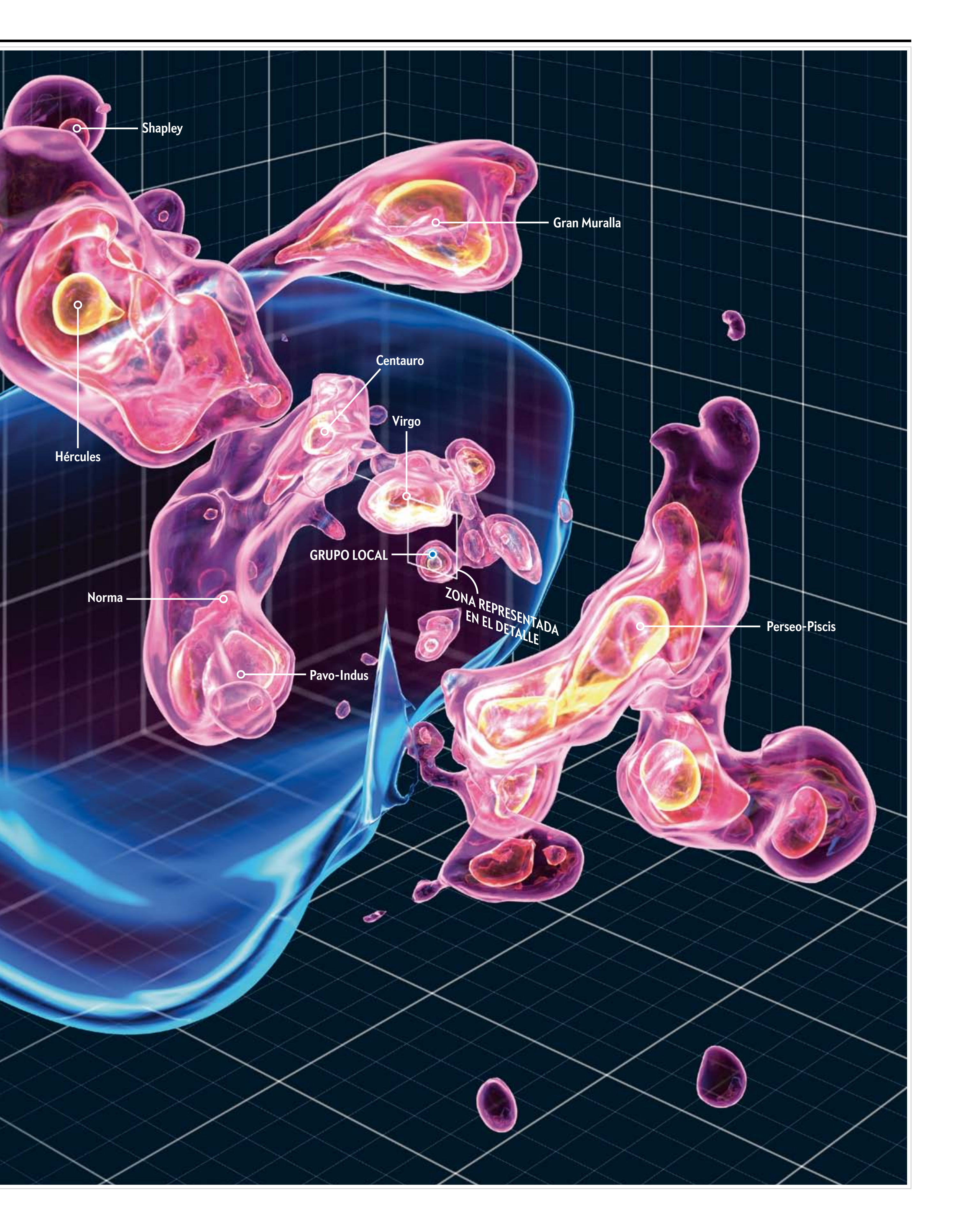
LANIAKEA

FLUJOS DE GALAXIAS

Un examen detallado de la estructura de Laniakea podría ayudar a entender mejor la distribución de la materia oscura y el proceso de evolución de las galaxias. Consideremos un corte tridimensional de Laniakea que incluya a la Vía Láctea y el Grupo Local (*recuadro inferior*). Las flechas indican los movimientos de las galaxias, las cuales fluyen hacia zonas con una gran densidad de materia (*colores más cálidos*) y se alejan de las regiones de baja densidad (*colores fríos*). El movimiento colectivo de las galaxias revela las concentraciones cósmicas de materia (normal u oscura). Las mediciones de esos flujos galácticos efectuadas por uno de los autores (Libeskind) han demostrado que el Grupo Local está cayendo a lo largo de un filamento de materia oscura de 50 millones de años luz hacia el cúmulo de Virgo (*amarillo*), una aglomeración de más de mil galaxias comprimidas en un volumen de 13 millones de años luz. Se cree que tales filamentos desempeñan un papel clave en la formación y evolución de las galaxias.



BRYAN CHRISTIE (*ilustración*); FUENTES: «PLANES OF SATELLITE GALAXIES AND THE COSMIC WEB», NOAM I. LIBESKIND ET AL. EN *MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY*, VOL. 452, N.º 1, SEPTIEMBRE DE 2015 (*recuadro inferior*); DANIEL POMARÈDE, HÉLÈNE M. COURTOIS, YEHUDA HOFFMAN Y BRENT TULLY (*datos para la ilustración de Laniakea*);


Shapley
Gran Muralla
Hércules
Centauro
Virgo
GRUPO LOCAL
Norma
ZONA REPRESENTADA EN EL DETALLE
Perseo-Piscis
Pavo-Indus

Viene de la página 27
ellos parece brillar cuatro veces menos que el otro, sabremos que el más débil se encuentra dos veces más lejos. En astronomía, esos faros idénticos se denominan candelas estándar: objetos astrofísicos que presentan siempre la misma luminosidad intrínseca, sin importar en qué lugar del universo se encuentren. Las candelas estándar incluyen algunos tipos de estrellas pulsantes y de explosiones estelares, pero también grandes galaxias, como en 1977 propuso uno de nosotros (Tully) junto con J. Richard Fisher. La llamada «relación de Tully-Fisher» se basa en que las galaxias de mayor tamaño son más luminosas y rotan más rápido que las pequeñas, puesto que tienen más estrellas y han de girar a más velocidad para mantenerse estables en un campo gravitatorio más intenso. Por tanto, si medimos la velocidad de rotación de una galaxia, conoceremos su luminosidad intrínseca. Después, al compararla con su brillo aparente, podremos deducir la distancia a la que se halla.

Cada tipo de candela estándar funciona mejor en un ámbito característico. Las cefeidas, una clase de estrellas pulsantes, solo pueden observarse bien en galaxias cercanas a la Vía Láctea, por lo que no resultan adecuadas para medir distancias mayores. La relación de Tully-Fisher puede usarse con numerosas galaxias espirales, pero las distancias calculadas con ella presentan incertidumbres de hasta un 20 por ciento. Las explosiones estelares conocidas como supernovas de tipo Ia permiten reducir a la mitad esa incertidumbre y pueden observase a través de vastas distancias cósmicas, pero son poco frecuentes: en una galaxia de buen tamaño, apenas aparece una cada siglo.

Si pudiéramos obtener las velocidades peculiares de una amplia muestra de galaxias distribuidas por el universo, podríamos cartografiar los movimientos galácticos a las mayores escalas. Tales flujos de galaxias pueden compararse con ríos que serpentean a través de «cuencas cósmicas»; solo que, en lugar de por la topografía, su curso queda determinado por la atracción gravitatoria que ejercen las estructuras cercanas. En estos mapas «cosmográficos», las galaxias fluyen en corrientes, giran en remolinos y se acumulan en embalses, lo que indirectamente revela la estructura, la dinámica, el origen y el futuro de las mayores acumulaciones de materia del universo.

Para obtener un mapa a la escala necesaria para abordar nuestras preguntas sobre la materia y la energía oscuras, fue necesario catalogar los mejores datos de un gran número de programas de observación. En 2008, Tully, Hélène M. Courtois, ahora en el Instituto de Física Nuclear de Lyon, y sus colaboradores publicaron el catálogo Cosmicflows, que cotejó múltiples conjuntos de datos para detallar la dinámica de 1800 galaxias situadas a distancias de hasta 130 millones de años luz. En 2013, el equipo amplió su trabajo con el catálogo Cosmicflows-2, que incluía los movimientos de cerca de 8000 galaxias en un radio de unos 650 millones de años luz. Uno de los miembros del grupo, Yehuda Hoffman, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, desarrolló métodos para derivar con precisión la distribución de materia oscura a partir de las velocidades peculiares registradas en Cosmicflows.

A medida que se ampliaba el catálogo, nos sorprendió encontrar un patrón inesperado: los contornos de una estructura cósmica nunca antes observada. Todos los cúmulos de galaxias en un espacio de más de 400 millones de años luz se movían juntos en una «cuenca de atracción» local, de modo semejante al agua que se acumula en el punto más bajo de un terreno. Si no fuera por la incesante expansión del universo, todas esas galaxias acabarían por fundirse en una única estructura compacta por efecto de la gravedad. En conjunto, este vasto enjambre de galaxias constituye Laniakea.

Hasta ahora, los estudios del flujo de las galaxias que integran Laniakea revelan que estas se comportan tal y como cabría esperar a partir de los principales modelos sobre la distribución cósmica de materia oscura (aunque no podamos verla, es posible inferir con una precisión razonable dónde se acumula). Por otra parte, y para bien o para mal, la densidad total de materia visible y oscura en Laniakea parece indicar que, justo como indican las consideraciones teóricas basadas en la energía oscura, el universo está destinado a una muerte fría, con una expansión cada vez más acelerada.

Las galaxias fluyen en corrientes y giran en remolinos que, de manera indirecta, revelan el origen y el futuro de las mayores acumulaciones de materia del universo

Tales conclusiones son aún provisionales. La abrumadora tarea de cartografiar movimientos galácticos todavía tiene un largo camino por delante. En la actualidad solo hemos determinado las velocidades peculiares del 20 por ciento de las galaxias situadas a menos de 400 millones de años luz, y buena parte de las distancias estimadas con candelas estándar adolecen aún de grandes incertidumbres. Aun así, el mapa que estamos trazando de nuestro vecindario galáctico nos permite comprender mejor nuestro lugar en la topografía cósmica.

NUESTRO CONTEXTO COSMOGRÁFICO

Hagamos un recorrido por los componentes que fluyen a toda velocidad en nuestro recién descubierto hogar, Laniakea, empezando por la parte más familiar: nosotros. Con independencia de lo lento o rápido que se esté moviendo usted mientras lee esto, se encuentra girando alrededor del Sol a unos 30 kilómetros por segundo. A su vez, el Sol orbita en torno al centro galáctico a unos 200 kilómetros por segundo, y todo el Grupo Local, incluida la Vía Láctea, se precipita a más de 600 kilómetros por segundo hacia una misteriosa concentración de masa situada en la dirección de Centauro (más tarde volveremos sobre este punto). Probablemente nunca haya pensado que podía moverse a tal velocidad mientras leía una revista.

Si nos alejamos de la Vía Láctea, nuestro viaje a través de Laniakea comienza con dos galaxias enanas: la Pequeña y la Gran Nube de Magallanes, situadas «solo» a entre 180.000 y 220.000 años luz. Las Nubes de Magallanes pueden vislumbrarse desde el hemisferio sur, si bien las mejores vistas nos las ofrece la Antártida durante el invierno. Aparte de ellas, la única galaxia apreciable a simple vista es Andrómeda, aunque apenas se observa como una macha borrosa en un cielo muy oscuro.

Andrómeda se halla a 2,5 millones de años luz y se desplaza hacia nosotros con una velocidad peculiar de unos 110 kilómetros por segundo. Dentro de unos 4000 millones de años, colisionará contra la Vía Láctea, en un choque frontal que convertirá a ambas galaxias en un único y anodino elipsoide de viejas estrellas rojas.

Es poco probable que el sistema solar se vea afectado por este choque cósmico: la distancia entre estrellas es tan vasta que, por lo general, ninguna acabará acercándose tanto a otra como para colisionar. La Vía Láctea, Andrómeda y otras cuatro docenas de galaxias pertenecen al Grupo Local, una región donde la gravedad ha ganado la batalla contra la expansión cósmica, por lo que las galaxias están acercándose. Al igual que la Vía Láctea presenta sus Nubes de Magallanes, todas estas grandes galaxias tienen sus propios séquitos de galaxias enanas.

Un poco más allá del Grupo Local, en un radio de unos 25 millones de años luz, nuestros mapas muestran tres elementos muy bien diferenciados. La mayoría de las galaxias contenidas en esa región, incluida la nuestra, se sitúan en lo que se conoce con el poco imaginativo nombre de Hoja Local. Como indica su apelativo, es muy delgada: la mayor parte de las galaxias se encuentran a menos de 3 millones de años luz de esta estructura, la cual define el plano ecuatorial del sistema de coordenadas supergaláctico. Bajo este plano, tras un hueco, hay un filamento de galaxias (la Espuela de Leo) y las nubes de Antlia y Dorado. Sobre el plano no hay prácticamente ninguna otra estructura cercana. Dicho desierto recibe el nombre de Vacío Local.

Si solo consideramos las galaxias de la Hoja Local, la situación parece muy tranquila. Sus galaxias se separan al ritmo que marca la expansión cósmica, con pequeñas velocidades peculiares provocadas por sus interacciones locales. Por debajo de la Hoja Local, las galaxias de las nubes de Antlia y Dorado, así como las de la Espuela de Leo, presentan también velocidades peculiares bajas. Sin embargo, se aproximan a la Hoja Local a gran velocidad. El responsable probablemente sea el Vacío Local. Los vacíos cósmicos se expanden como globos que se inflan y la materia se mueve de las regiones menos densas a las más densas, acumulándose en sus bordes. Ahora entendemos que la Hoja Local es una «pared» del Vacío Local, y que este se expande y nos empuja hacia abajo: hacia Antlia, Dorado y Leo.

Si seguimos alejándonos encontraremos el cúmulo de Virgo, con tantas galaxias como 300 Grupos Locales comprimidas en un volumen de 13 millones de años luz de diámetro. Estas avanzan como balas, con velocidades de unos 700 kilómetros por segundo. Toda galaxia situada a menos de 25 millones de años luz del exterior del cúmulo se encuentra cayendo hacia su interior y pasará a formar parte de él antes de 10.000 millones de años. Los dominios de Virgo (la región que acabará capturando con el tiempo) se extienden actualmente hasta un radio de 35 millones de años luz. Curiosamente, la Vía Láctea, a 50 millones de años luz, queda justo fuera de esa zona de captura.

EL GRAN FLUJO GALÁCTICO

La gran región en torno al cúmulo de Virgo que se extiende hasta nuestra posición es el Supercúmulo Local. Hace casi 30 años, un grupo de astrónomos, que acabaron siendo conocidos con el divertido apodo de «los Siete Samuráis», descubrieron que no es solo la Vía Láctea la que avanza a cientos de kilómetros por segundo en la dirección de Centauro, sino que lo mismo ocurre con todo el Supercúmulo Local. A la masa misteriosa que tira de todas estas galaxias la denominaron Gran Atractor. En muchos sentidos, el Gran Atractor no resulta tan enigmático: la densidad de materia en esa dirección del cosmos es claramente elevada, ya que hay siete cúmulos equiparables al de Virgo en una esfera de 100 millones de años luz de diámetro. Tres de los más grandes son los de Norma, Centauro e Hidra.

De acuerdo con nuestra concepción de los supercúmulos como cuencas cósmicas, según la cual los límites de estos objetos se establecen a partir de los movimientos divergentes de las galaxias, el Supercúmulo Local no hace gala de un nombre adecuado. Solo es una parte de algo mayor: Laniakea, que comprende otras estructuras de gran tamaño, como el filamento de Pavo-Indus y el cúmulo de Ofiuco. Si Laniakea fuese una ciudad, el centro, atestado de tráfico, sería la región del Gran Atractor. Como ocurre con la mayoría de los núcleos urbanos, resulta difícil especificar un centro preciso, pero podemos situarlo de manera aproximada en algún lugar entre los cúmulos de Norma y Centauro. Eso coloca a la Vía Láctea en la periferia lejana, cerca del borde de un supercúmulo contiguo conocido como Perseo-Piscis. Dicho borde se encuentra tan cerca —en términos cósmicos— que podemos estudiarlo en detalle para definir el contorno borroso, aproximadamente esférico y de unos 500 millones de años luz de ancho de Laniakea. Entre materia oscura y materia ordinaria, Laniakea comprende una masa total equivalente a la de 100.000 billones (10^{17}) de soles.

Los astrónomos llevan decenios intuyendo lo que puede haber más allá de Laniakea. Poco después de que los Siete Samuráis descubriesen el Gran Atractor, se vislumbró una estructura aún mayor. Justo tras la región del Gran Atractor, pero tres veces más lejos, hay una monstruosa reunión de cúmulos, la más densa conocida en el universo local. El primero en aportar pruebas de su existencia fue el astrónomo Harlow Shapley en los años treinta del siglo xx, por lo que esta agrupación se conoce como supercúmulo de Shapley. (Por cierto: al igual que la Hoja Local, también el cúmulo de Virgo, la banda principal del Supercúmulo Local, el Gran Atractor y el supercúmulo de Shapley se encuentran en el ecuador supergaláctico. Si imaginamos un inmenso panqueque de supercúmulos galácticos, tendremos una buena imagen de nuestro entorno cósmico.)

Así pues, ¿qué causa la velocidad peculiar de 600 kilómetros por segundo a la que se desplaza nuestro Supercúmulo Local? Hasta cierto punto, el responsable debe ser el Gran Atractor. Pero también hemos de considerar el tirón gravitatorio del supercúmulo de Shapley, que, aunque se halla tres veces más lejos, incluye una cantidad cuatro veces mayor de grandes cúmulos. Sin embargo, según el catálogo Cosmicflows-2 (el mismo que sirvió para descubrir Laniakea), aún hay más. Las velocidades peculiares de las 8000 galaxias de este compendio muestran un movimiento coherente hacia el supercúmulo de Shapley. Dicho flujo abarca todo el volumen del catálogo Cosmicflows-2: unos 1400 millones de años luz de un extremo a otro.

¿Acaba ahí? No lo sabemos. Necesitamos sondeos más ambiciosos y que cartografíen franjas aún mayores del universo para revelar la fuente última —y la estructura última— que causa este épico flujo de galaxias de nuestro universo local. ■

PARA SABER MÁS

Cosmography of the local universe. Hélène M. Courtois et al. en *Astronomical Journal*, vol. 146, n.º 3, art. 69, septiembre de 2013.

The Laniakea supercluster of galaxies. R. Brent Tully et al. en *Nature*, vol. 513, págs. 71-73, septiembre de 2014.

Planes of satellite galaxies and the cosmic web. Noam I. Libeskind et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 452, n.º 1, págs. 1052-1059, septiembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Supercúmulos y vacíos en la distribución de galaxias. Stephen A. Gregory y Laird A. Thompson en *IyC*, mayo de 1982.

Galaxias enanas en la red cósmica. Noam I. Libeskind en *IyC*, mayo de 2014.



SALUD PÚBLICA

EL SÍNDROME POST-ÉBOLA

Numerosos supervivientes del virus en Liberia sufren ahora déficits cerebrales y otros síntomas. Las causas principales: remanentes ocultos del virus y reacciones inflamatorias del sistema inmunitario

Seema Yasmin

Seema Yasmin, escritora y doctora en medicina, informó para nuestra revista desde Liberia. El viaje fue sufragado por el Centro Pulitzer de Reportajes de Crisis.



Josephine Karwah salió de la unidad de tratamiento del ébola acariciando su vientre gestante. Dos semanas antes, en agosto de 2014, a duras penas había podido entrar por su propio pie en aquella tienda de campaña blanca en Monrovia, con un dolor acuciante en las rodillas que la hacía claudicar cada cuatro pasos.

La madre de Josephine había fallecido en esa misma tienda. Se habían llevado su cuerpo en un saco blanco que las enfermeras habían rotulado con su nombre en un lateral. Su padre también había fallecido por el ébola, al igual que sus tíos. Josephine, también infectada, lo había superado. Ella y su hijo nonato eran supervivientes, a diferencia del 40 por ciento de los afectados por la epidemia de ébola desatada entre 2014 y 2016 en África. Por eso decidió que se llamaría Miracle («milagro»).

Entonces comenzaron las pesadillas. En su pueblo natal «Smell No Taste», a una hora de viaje en coche al este de la capital, Josephine soñaba con los seres queridos que había perdido por culpa del ébola y con los horrores de la unidad de tratamiento. Sufría cefaleas intensas y dolores en las caderas y las rodillas que le impedían conciliar el sueño. Por el día ayudaba a su hermana a fabricar jabón para venderlo en el mercado. Pero sentía una quemazón en el ojo derecho y veía borroso por el izquierdo, como si mirase a través de una lente salpicada de rocío. Un día, salió de la caseta de cambio de moneda con el dinero equivocado, incapaz de recordar con cuántos dólares liberianos había salido de casa.

Josephine es uno de los 1500 supervivientes del ébola en Liberia. Como ella, muchos sufren pérdidas de memoria, artralgias, mialgias y problemas visuales. No son casos esporádicos o anecdóticos. Mosoka Fallah, epidemiólogo liberiano, comunicó los hallazgos del mayor estudio descriptivo de supervivientes del ébola hasta la fecha en una conferencia celebrada en Boston el pasado febrero. Más de la mitad de los que sobrevivieron al ataque agudo del virus han padecido mialgias y problemas articulares. Dos terceras partes referían alteraciones neurológicas y un 60 por ciento presentaba trastornos visuales al año de haber sufrido la infección. A pesar de que la Organización Mundial de la Salud declaró el fin de la emergencia pública el pasado marzo, las personas afectadas sufren ahora lo que los médicos han bautizado como el síndrome post-ébola.

No es la primera vez que se detectan casos de tal síndrome. Los supervivientes de pequeños brotes acaecidos en África Oriental y Central en los últimos veinte años sufrieron artralgias, mialgias y problemas visuales tan serios que les impedían trabajar.

Pero esas fueron solo pequeñas reagudizaciones de la enfermedad, que afectaron a grupos reducidos de supervivientes. La epidemia de 2014-2016 en ese continente ha dejado a 17.000 supervivientes en riesgo de padecer el síndrome post-ébola. Como Josephine, salieron de la unidad de tratamiento con un futuro incierto ante ellos. Lo que los pacientes y los médicos saben con certeza es que el virus no ha dicho su última palabra.

EL FANTASMA DEL ÉBOLA

Fallah es un experimentado epidemiólogo graduado por la Universidad Harvard. Su despacho se encuentra al final de un largo pasillo del Centro Médico John F. Kennedy en Monrovia. Creció en uno de los mayores suburbios de Liberia y ha formado parte del equipo encargado de ensayar tratamientos y vacunas en el período inicial de respuesta al ébola. Su estudio acerca de los supervivientes nació de ese trabajo.

De la coalición entablada en 2014 entre la red de Institutos Nacionales de Salud de EE.UU. (NIH) y el Ministerio de Salud y Servicios Sociales de Liberia nació la Asociación para la Investigación de Vacunas contra el Ébola en Liberia (*Partnership for Research on Ebola Vaccines*, PREVAIL). Pero para cuando habían ultimado los ensayos preliminares de seguridad de las vacunas, la epidemia comenzaba a declinar y el número de nuevos infectados disminuyó hasta cifras menores de lo esperado. Así, el primer estudio, PREVAIL I, pasó a centrarse en el perfil de seguridad de la vacuna y en la respuesta inmunitaria que desencadenaba, en lugar de en su capacidad para prevenir el ébola. Los recursos científicos del programa PREVAIL se redirigieron a los efectos post-ébola. Cada vez eran más los casos verificados por toda África Occidental de supervivientes aquejados de problemas físicos y psicológicos. Fallah fue elegido investigador

EN SÍNTESIS

Declarado el fin de la epidemia de ébola en África Occidental, unas 17.000 personas corren ahora el riesgo de sufrir síntomas del llamado síndrome post-ébola.

En un estudio realizado en Liberia, un 60 por ciento de los supervivientes referían problemas visuales, un 53 por ciento sufrían mialgias y artralgias, y un 68 por ciento, trastornos neurológicos.

Estas personas, supuestamente curadas, ven cómo el resto de la población las rehuye a menudo y se preguntan si la enfermedad les volverá a afectar en el futuro.

PÁGINAS ANTERIORES: EDEL RODRIGUEZ

Posibles focos de virus oculto

Más de la mitad de los afectados por el ébola tienen problemas serios una vez que la enfermedad ha remitido, según un estudio en que han participado más de un millar de los 1500 supervivientes confirmados en Liberia. Las afecciones incluyen trastornos neurológicos y dolores musculares. La hipótesis plantea que el virus permanece oculto en partes del cuerpo que, como el ojo, no están sometidas a un control riguroso por el sistema inmunitario. O tal vez la respuesta inmunitaria inicial desatada contra el virus cause inflamación y daños en los órganos. Estas son las partes del cuerpo afectadas con frecuencia y los síntomas causados. El ojo es un foco de especial importancia, ya que casi un 60 por ciento refiere problemas de visión.

SHIZUKA AOKI

principal y viró su foco de atención de la respuesta al ébola a los supervivientes de la infección.

Un miércoles por la tarde, en la antevíspera de Navidad, hojeaba la historia clínica de un paciente en el Centro Médico Kennedy. Había supervisado la renovación del espacio y el equipamiento de la segunda planta del centro para estudiar a los supervivientes del ébola. Una larga fila de hombres y mujeres sentados a todo lo largo del pasillo que conduce a su despacho esperaban ser atendidos por el equipo médico.

Desde que comenzara el estudio de los supervivientes liberianos en junio de 2015, más de 1000 de los 1500 supervivientes confirmados del país han accedido a participar. Se les someterá a una revisión médica semestral durante 5 años. A todos se les pide que acudan con cuatro familiares o amigos a uno de los tres centros que participan en el estudio. Deben ser personas con las que mantengan un contacto estrecho pero que no hayan sido infectadas. De esta manera, Fallah espera contar con cerca de 6000 personas que servirán de controles, con el propósito de distinguir entre los problemas de salud derivados exclusivamente del síndrome post-ébola y los problemas habituales que aquejan a la población general.

Los primeros resultados que Fallah dio a conocer en febrero eran poco alentadores: el 60 por ciento del millar de supervivientes presentaban trastornos visuales, el 53 por ciento referían dolores musculares y articulares, y el 68 por ciento, trastornos neurológicos. Su equipo quiso profundizar en el daño que podía producir el virus en el sistema nervioso central. Un grupo de neurólogos se reunió en abril y constató que casi tres cuartas partes padecían cefaleas, un 72 por ciento sufrían algún tipo de depresión, y más de la mitad relataban episodios pasajeros de amnesia y tenían dificultades para caminar.

Uno de cada cuatro o cinco supervivientes padecía cambios oculares que afectaban su visión. Al profundizar, el equipo de Fallah halló que un 10 por ciento sufría uveítis, una inflamación de la capa media del globo ocular. Ya al inicio de la investigación reparó en los problemas oculares. «A medida que avanzaba la guerra —la epidemia, quiero decir— vimos que se repetían diferentes manifestaciones en los supervivientes, y esto nos condujo a hacer estudios más específicos», relata. «Y estaba claro que había que empezar por el ojo.»

Revisando estudios previos de supervivientes desde los años noventa, constató que muchos describían problemas oculares durante la convalecencia. De la veintena justa de afectados por el brote de 1995 en la República Democrática del Congo, a la que se examinó dos meses después de vencer la infección, cuatro presentaron dolor ocular, fotofobia, pérdida de agudeza visual

y uveítis. En el caso del brote de Uganda en 2007, se sometió a seguimiento a 49 pacientes durante más de dos años. También relataban problemas de visión borrosa y dolor retrocular, además de episodios de amnesia, dolor articular, trastornos del sueño y pérdidas de la audición.

Un estudio reciente de ocho pacientes con ébola tratados en EE.UU. comprobó que todos sufrían algún tipo de síntomas del síndrome post-ébola hasta cuatro meses después de recibir el alta hospitalaria. Seis referían problemas psicológicos tales como depresión, ansiedad o amnesia, y cinco, visión borrosa y dolor ocular, entre otros problemas visuales. No había duda de que el síndrome era real. Pero la información disponible aún no aclaraba cómo causaba el virus tales problemas.



REPERCUSIÓN: Josephine Karwah, que superó la infección por ébola para después quedar aquejada de otros síntomas, ante una tienda en su pueblo Smell No Taste, en Liberia.

SEEMA YASMIN

LAS SECUELAS A EXAMEN

Esa confusión ya se vivió con la infección por el VIH. En los años ochenta, los investigadores que se enfrentaban a esa nueva amenaza vírica intentaron entender sus efectos aplicando lo que ya conocían de otras infecciones. Esto mismo sucede hoy con el ébola, según explica Avindra Nath, neuróloga y científica en los NIH que colabora con Fallah. Nath ha estudiado infecciones del sistema nervioso central durante casi 30 años. Aunque el ébola no es un retrovirus como el VIH, Nath cree que nuestro conocimiento tras años de estudio de la fisiopatología del VIH ha permitido entender mejor los efectos del ébola sobre el sistema nervioso. «El ébola se ha beneficiado de los estudios precedentes sobre el VIH. La carrera de muchos de los que ahora trabajamos con él ha girado en el pasado alrededor del VIH y estamos enfocando nuestros conocimientos y las técnicas disponibles en estos pacientes.»

Nath se pregunta si los síntomas neurológicos de los supervivientes del ébola son secuelas directas del virus o derivan de la respuesta inmunitaria contra la infección. En el caso del VIH, el virus infecta los macrófagos (células inmunitarias presentes en el cerebro, entre otros órganos) y provoca que estos liberen citocinas, pequeñas proteínas que resultan tóxicas para las neuronas. Estudios con monos demuestran que el ébola infecta los macrófagos y puede desatar esa «tormenta de citocinas» (las citocinas son mensajeros químicos entre células que activan una cascada inflamatoria). Esto puede desencadenar hemorragias por todo el organismo, incluido el cerebro, lo que podría explicar los problemas de memoria, las cefaleas y los trastornos motrices que Nath ha observado en los supervivientes de ébola.

Los neurólogos buscan pistas en el VIH para entender cómo afecta el ébola al cerebro. Para comprender otro de los síntomas más frecuentes, la astenia extrema que sigue a la infección, hay que buscar en otras infecciones víricas. Diversos estudios demuestran que casi una cuarta parte de los enfermos de dengue y hasta un 40 por ciento de los infectados por el virus de Epstein-Barr refieren astenia tras la fase aguda de la enfermedad. De nuevo podría ser consecuencia de la respuesta inflamatoria provocada por las citocinas. Estas actuarían sobre receptores del cerebro y causarían astenia e inapetencia tras la infección.

Las artralgias (dolores articulares) son uno de los síntomas más frecuentes del síndrome post-ébola. Entre los supervivientes del brote del Congo estudiados en 1995, casi dos terceras partes referían artralgias dos años después de la infección. En el brote de Uganda, afectaban a una tercera parte de los estudiados.

La irritación y la inflamación articular podrían estar motivadas por la acumulación de proteínas del sistema inmunitario que tiene lugar en ciertas articulaciones, como las caderas o los hombros. Otros componentes inmunitarios, como los anticuerpos, podrían explicar e incluso ser marcadores fiables de la artralgia. En el brote del Congo, los aquejados de dolores articulares mostraban mayores cifras de anticuerpos que los exentos de tal síntoma. La concentración de dímeros D, pequeños fragmentos proteicos procedentes de la degradación de los trombos, también se ha vinculado con la artralgia en convalecientes de otras infecciones. En el caso de los infectados por la bacteria *Neisseria meningitidis* con artralgias postinfecciosas, los niveles de dímeros D son elevados. Hasta hoy no se han llevado a cabo estudios de las concentraciones de dichos dímeros en los supervivientes de ébola.

LOS ESCONDRIJOS DEL VIRUS

La afectación ocular también podría ser debida a la respuesta inflamatoria que provoca el virus, según los expertos. Es más, el virus podría quedar acantonado en el globo ocular, donde seguiría replicándose tiempo después de haber sido eliminado de la sangre. El globo ocular es un lugar seguro, lejos de la vigilancia del sistema inmunitario. En el de un superviviente se hallaron concentraciones alarmantes de ébola. Ian Crozier, médico estadounidense, se infectó con el virus en septiembre de 2014 mientras trabajaba en Sierra Leona. Menos de dos meses después de recibir el alta, comenzó a sufrir dolor en su ojo izquierdo y advirtió que le había cambiado de color, de azul a verde. Cuando los médicos le practicaron una punción, hallaron en su interior más copias del virus que las que habían detectado en su torrente sanguíneo semanas antes, cuando yacía al borde de la muerte.

El globo ocular no es el único escondrijo del ébola. Otros refugios para muchos otros patógenos, como el VIH, son los testículos, el sistema nervioso central y el cartílago articular. Cuando el sistema inmunitario desencadena una respuesta inflamatoria contra los agentes extraños, estos tejidos corren el riesgo de sufrir daños. Por eso han desarrollado sistemas de protección, como moléculas inmunosupresoras y barreras

físicas. Tales medidas resultan ideales para los virus alojados en esos tejidos. La existencia de estos reservorios ocultos de virus podría explicar por qué Pauline Cafferkey, una enfermera escocesa que se recuperó del ébola, volvió a recaer nueve meses después de dar negativo en los análisis de sangre y de nuevo un año después de la primoinfección.

Si los testículos albergan ébola, esto podría explicar por qué el virus perdura durante meses en el semen de algunos supervivientes sin generar ningún síntoma perceptible. Al comienzo del brote de África Occidental, la Organización Mundial de la Salud recomendaba usar anticonceptivos de barrera al menos durante los tres meses siguientes al resultado negativo en los análisis. Esta recomendación se basaba en datos del brote del Congo en 1995, en el que detectaron el virus en el semen de supervivientes hasta 82 días después del inicio de los síntomas.

Sin embargo, en el brote de África Occidental, el virus perduró mucho más tiempo en el semen, hasta más de un año después de la infección aguda. Fallah corroboró este dato en la Conferencia de Boston, pues en el brote de Liberia se detectó el virus en el semen hasta 18 meses después. En algunos hombres desaparecía del semen para reaparecer en el transcurso de un año. (En la actualidad, la OMS recomienda usar el preservativo durante un año y analizar el semen con frecuencia.)

En su oficina de Monrovia, Fallah estudia el historial de una mujer cuyo hijo falleció por ébola en noviembre de 2015. La familia aseguraba no haber tenido contacto con nadie enfermo por ébola ni con supervivientes, pero Fallah sospecha que la madre pudo mantener relaciones sexuales con un superviviente, no se percató de que estaba enferma y acabó contagiando a su hijo.

Fallah ya había investigado un caso de ébola transmitido seguramente por contacto sexual. En marzo de 2015, una mujer falleció por ébola. Se supo que había mantenido relaciones íntimas con un hombre dado de alta de la unidad de tratamiento del ébola seis meses antes. Las muestras de sangre del hombre fueron negativas, pero su semen albergaba el virus.

Fallah frunce el ceño cuando habla de la mujer que contrajo el ébola de un superviviente. Pensar que el virus pueda perdurar mucho después del cese de los síntomas, incluso cuando los análisis de sangre ya dan negativos, le genera una honda preocupación. Si el ébola se esconde en las personas aparentemente sanas hasta reaparecer desde reservorios ocultos del cuerpo para hacerles enfermar de nuevo y ser contagiosos en potencia, podría desatar nuevos brotes.

Sin embargo, hallar el genoma del virus o partes de su ARN en los líquidos corporales de los supervivientes no basta para demostrar que sean contagiosos. Lo que realmente preocupa es que esos hallazgos contribuyan a su estigmatización. «Ya lo tienen difícil con el síndrome post-ébola y sus síntomas inexplicables, no sabemos por cuánto tiempo. Ya sufren bastante. Ahora imagine si la gente los margina por miedo al contagio.»

TRAGEDIA UTERINA

Días después de salir de la unidad de tratamiento de Monrovia, mientras dormía en su cama de Smell No Taste, Josephine se despertó pasada la medianoche. No tenía pesadillas o cefalea; esta vez era un fuerte dolor en el abdomen. Fue al baño y al acabar vio restos de sangre en el papel. Entonces rompió aguas. «¡Ofelia!», gritó a su hermana. Llamaron a una ambulancia pero les informaron que no había ninguna disponible. Así que llamaron a una emisora de radio de Monrovia para pedir ayuda. Nadie acudió.

Josephine caminaba de un lado a otro de su habitación; a ratos se apoyaba en la pared cada vez que el estómago parecía que iba a desgarrarse. A las 5 de la madrugada se envolvió en una lapa granate, un pareo tradicional de Liberia, y salió tambaleándose de la casa. Si nadie acudía, saldría a la calle en busca de ayuda. El pueblo dormía; aún quedaba una hora para el amanecer. Caminó bordeando la casa apoyándose contra la pared para no caer. Las vecinas salieron de sus casas al oírla gritar: «¡Ayúdenme, ayúdenme!». Pero nadie se acercó, por miedo a tocar a la mujer que había salido de la unidad de ébola pocos días antes. Cuando llegó a la casa de la esquina, las fuerzas le abandonaron: cayó al suelo, con la espalda contra la pared, y sintió a su bebé entre las piernas.

Se le acercaron cinco mujeres desliando sus lapas al andar y con ellos formaron un semicírculo en torno a ella para que los mirones no pudieran verla dar a luz. Josephine empujó, gimió y Miracle nació. Qué niño más gordito, pensó, al levantar al bebé que permanecía en completo silencio contra su pecho: Miracle no respiraba.

Nadie osaba tocarla. Las mujeres la miraban mientras lloraba y acunaba a su bebé contra el pecho. Solo se acercó el hermano de ella. Tomó a Miracle de sus brazos y lo envolvió con la placenta en una toalla amarilla, a modo de mortaja improvisada.

Su madre había sido comadrona antes de morir de ébola. «¿Por qué no estuvo aquí para ayudarme?», se lamentaba Josephine. Y las preguntas se sucedieron en las semanas siguientes: ¿Había sido el ébola el causante de la muerte de Miracle, o no vivió porque nadie quiso ayudarla? ¿Habría sobrevivido si la ambulancia hubiera venido? ¿Seguía el virus al acecho dentro de ella? ¿Podría dañar a futuros fetos?

Los días que acude al Centro Médico Kennedy para sus revisiones como superviviente, Josephine le hace esas mismas preguntas a Fallah. Una tarde, sentada en su consulta con una camiseta y pañuelo en la cabeza a juego, espera su respuesta.

Fallah teme que el útero pueda ser otro refugio del virus, un lugar seguro desde donde volver a hacer de las suyas. Podría reaparecer e infectar a otras personas. También se pregunta si la tensión que supone ser una superviviente del ébola puede llegar a hacer que alguien dé a luz a un mortinato en plena calle sin que nadie se digne a prestar ayuda. «Si ya no puedes vender jabón en el mercado, si tienes que liar tu dinero en papel para comprar las verduras, si tu novio te repudia porque eres una superviviente, ¿qué impacto tiene todo eso en el cuerpo de una persona?», se plantea Fallah. «¿Y pudo afectar todo eso al nonato?». Esto es lo que se le pasa por la cabeza, pero cuando Josephine le interpela, solo acierta a decir: «No lo sé, Josephine. Intentamos averiguarlo». IyC

PARA SABER MÁS

Possible sexual transmission of Ebola virus-Liberia, 2015. A. Christie et al. en *Morbidity and Mortality Weekly Report*, vol. 64, n.º 17, págs. 479-481, 8 de mayo de 2015.

Persistence of Ebola virus in ocular fluid during convalescence. Jay B. Varkey et al. en *New England Journal of Medicine*, vol. 372, págs. 2423-2427, 18 de junio de 2015.

Serious and common sequelae after Ebola virus infection. Luke Hunt y Victoria Knott en *Lancet Infectious Diseases*, vol. 16, n.º 3, págs. 270-271, marzo de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nuevas epidemias. Virus Ebola. Kristin Leutwyler en *IyC*, abril de 1996.

La batalla contra el ébola. Helen Branswell en *IyC*, abril de 2015.



CADA TIGRE posee un patrón único de rayas que permite reconocer a cada individuo a partir de fotografías, y de esta manera contar sus efectivos.

CONSERVACIÓN

TRAS LA PISTA DEL TIGRE

Las técnicas que permiten seguir el rastro de este felino esquivo han progresado de manera espectacular, pero las agencias de conservación no lo han hecho al mismo ritmo

K. Ullas Karanth

CORTESÍA DE KALYAN VARMA

Desde mis días de escuela, cuando vivía en la jungla de las tierras montanas de Malenad, en el sudoeste de la India, me he sentido hechizado por el tigre. Los rituales que en la cultura hindú tienen como protagonista a este felino avivaban esta fascinación. Durante el festival de otoño del *Dasara*, que celebra el triunfo del bien sobre el mal, hombres musculosos interpretan la *Huli Vesha* (danza del tigre) con el cuerpo pintado de ocre, blanco y negro, imitando sus gráciles movimientos al son del *crescendo* de los tambores. El espectáculo era electrizante. Pero la realidad que se desplegaba a mi alrededor era desalentadora: los ganaderos y los cazadores deportivos estaban exterminando a los últimos tigres y los leñadores talaban sin tregua los ricos bosques para obtener madera. Cuando alcancé la adolescencia, a inicios de los sesenta, ya había abandonado el sueño de ver alguna vez un tigre en libertad.

Pero años después se produjo un suceso casi milagroso. En respuesta al clamor de los conservacionistas, Indira Gandhi, la entonces primera ministra de la India, instauró estrictas leyes de conservación y creó reservas de fauna protegidas. La conservación del tigre adquirió un impulso mundial en las décadas venideras. Muchos países prohibieron su caza e intentaron reconciliar las profundas contradicciones entre la necesidad que el tigre tiene de los bosques y las demandas humanas sobre este hábitat. La India lo hizo mejor que la mayoría de las naciones poseedoras de tigres: aunque alberga solo el 20 por ciento del hábitat idóneo para este felino que perdura en la actualidad, es el refugio del 70 por ciento de su población mundial. No es una hazaña menor, dada la presión en auge de sus 1200 millones de habitantes, la pobreza enquistada y la industrialización creciente.

Sin embargo, a pesar de tales iniciativas conservacionistas, las poblaciones de tigre han seguido menguando en toda Asia. Dos siglos atrás, el gran felino vagaba por una treintena de países del continente, desde los juncales del mar Caspio hasta la taiga rusa, desde los bosques indios hasta las pluviselvas de Indonesia. Esa área tan vasta se ha reducido en un 93 por ciento y ha quedado confinada a un puñado de países. Y las poblaciones con posibilidades de recuperación ocupan una superficie aún menor: menos del 5 por ciento del área de distribución original.

La situación de esos 40 a 50 grupos de tigres, denominados poblaciones fuente porque son los únicos lo bastante grandes para sostener la reproducción, es precaria. La mayoría están aislados y rodeados por entornos humanizados hostiles. A semejanza de los pacientes de cuidados intensivos, necesitan una atenta vigilancia. Pero a pesar de los dilatados esfuerzos de conservación, dicha vigilancia es la excepción y no la regla. Como resultado, los científicos no saben gran cosa sobre cómo les va realmente a los tigres en la naturaleza. Los métodos habituales de censado son suficientes, en el mejor de los casos, para saber dónde vagan aún en Asia, pero no para calcular con fiabilidad cuántos quedan. De hecho, muchas de las cifras que los conservacionistas airean en los medios se sustentan en pocas pruebas sólidas.

En los últimos años, nuestro grupo ha hecho progresos importantes en el problema de cómo censar a este felino esquivo. Aunando las técnicas de fototrampeo que permiten obtener instantáneas de los animales cuando pasan ante las cámaras, los programas informáticos que reconocen a cada individuo y los análisis estadísticos refinados que permiten estimar el tamaño de las poblaciones a partir de muestras de fotografías, hemos obtenido una imagen mucho más fiel de varias de sus poblaciones. El reto que ahora se nos plantea es conseguir que las agencias de conservación apliquen esos métodos de vigilancia mejorados para seguir la pista a las poblaciones fuente en toda su área de distribución.

UN TEMA ESCURRIDIZO

Averiguar cuántos tigres hay, y dónde, es una tarea formidable porque son escasos, reservados, vagan por zonas extensas y están dispersos por una vasta área geográfica. Durante décadas, esas circunstancias desbarataron todos los intentos emprendidos en los sesenta por funcionarios de la India, Nepal, Bangladés y Rusia para censar a los tigres mediante el recuento de sus huellas. Estos suponían que, de la misma manera que las huellas dactilares humanas son únicas, también debían serlo las pisadas de los tigres. Así, pensaron, podían censar a todos y cada uno de ellos contabilizándolas. Pero en realidad, ese tipo de métodos resultan infructuosos porque las huellas no siempre son fáciles de diferenciar, ni siquiera de encontrar. En la India, nubes de datos poco fiables recabados de ese modo daban la impresión de que el censo aumentaba, lo que generó una profunda complacencia acerca de la conservación a pesar de las amenazas que entretanto se cernían sobre ellos. Pero mientras los funcionarios andaban ocupados en su erróneo recuento de las pisadas, en los campos de la ecología, la fotografía, la programación informática y la estadística se sucedían rápidos progresos, que dieron pie a nuevos métodos capaces de contar con precisión los tigres.

En mi época de estudiante de posgrado en la Universidad de Florida, allá por los años ochenta, me esforcé por aprender tres aproximaciones nuevas al problema. Estaba decidido a penetrar en el mundo secreto del tigre para aprender acerca de su comportamiento y averiguar cuál era su situación real, en particular en el Parque Nacional Nagarahole, una de las reservas de Malenad en que ha empezado a recuperarse gracias a las órdenes de conservación de Gandhi. Tuve mi oportunidad en 1990, cuando trabajaba con la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre, de llevar a cabo mi primer estudio de radiotelemetría de los tigres en la India. Mediante la colocación de marbetes a unos cuantos individuos, pude descubrir aspectos de su comportamiento que serían importantes tanto para censar como para conservar la especie.

Recuerdo la mañana radiante y fría de un 29 de enero, cuando, sentado a cinco metros del suelo en lo alto de un árbol *Randia* y armado de un rifle lanzadardos, aguardaba a un tigre de 220 kilogramos al que otros miembros del equipo andaban persiguiendo con la intención de empujarlo hacia donde me hallaba sirviéndose de un gran embudo de tela. Desde mi posición elevada divisé un destello de luz dorada a 50 metros, entre el denso matorral. El felino avanzaba lentamente hacia mí. Cuando su hombro, y después sus flancos, aparecieron en mi punto de mira, apreté el gatillo. El dardo de roja cola voló por los aires y se clavó en su muslo arrancándole un suave gruñido. Pronto lo encontramos sedado, tendido a la sombra de un árbol; le colocamos un collar especial dotado de un radiotransmisor del

K. Ullas Karanth es investigador de la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre, que tiene su sede central en Nueva York. Formado en sus inicios como ingeniero, acabó convirtiéndose en biólogo de la conservación. Ha estudiado a los tigres durante más de treinta años.



EN SÍNTESIS

El tigre ha visto mermado su número hasta tal extremo que hoy solo ocupa el siete por ciento de su área de distribución original.

Su suerte depende del medio centenar escaso de poblaciones que tienen posibilidades de recuperación. Estas poblaciones precisan un atento seguimiento.

Muchas agencias de conservación emplean métodos anticuados para seguir la pista a este huidizo felino, lo que genera censos nada fiables y engañosos.

Nuevos datos sobre las presiones que padece y nuevas técnicas que estimen mejor dónde vive y cuántos hay son claves para salvar al tigre de la extinción.





ESPIANDO A LOS TIGRES: El autor instala una cámara trampa en un bosque de la India para fotografiar automáticamente a los felinos que pasen por allí (*1*). El tigre puede mostrar curiosidad o recelo ante las trampas después del primer destello del flash, lo que influye sobre la probabilidad de detecciones posteriores (*2*).

CORTESÍA DE KALYAN VARMA (*izquierda*); CORTESÍA DE K. ULLAS KARANTH Y SOCIEDAD PARA LA CONSERVACIÓN DE LA VIDA SILVESTRE (*derecha*)

tamaño de un puño, cuyas ondas podría captar con la antena que sostenía en la mano y que me permitirían conocer su paradero en todo momento. Un par de horas más tarde, el tigre (ahora etiquetado como T-04) se marchó para unirse a otros tres congéneres a los que ya había colocado un collar en la reserva de 645 kilómetros cuadrados.

A lo largo de los seis años siguientes, la radiotelemetría reveló los matices del comportamiento de los tigres y pude así pasar menos tiempo buscándolos a ciegas y dedicar más horas a su observación. Y lo que era más importante: pudimos saber por dónde vagaban. Los residentes a los que seguí la pista en Nagarahole tenían áreas de campeo de unos 18 kilómetros cuadrados en el caso de las hembras adultas y de unos 50 en el de los machos. El tigre es territorial y los adultos se mantienen alejados unos de otros salvo en el celo. La reducida extensión de las áreas de campeo sugiere que la densidad de las poblaciones de tigres en los parques protegidos como el de Nagarahole puede ser mayor de lo que se creía.

El trabajo de telemetría reveló también, con mayor detalle que nunca, lo que los tigres de Malenad comen, al conducirme a los malolientes cadáveres de sus presas. Junto a las heces que recogía, más apestosas si cabe, estos datos demostraban que el tigre suele matar un animal grande a la semana y que devora dos tercios del mismo en tres o cuatro días antes de abandonar el lugar. En último término, los hallazgos relativos a la alimentación implicaban que la disminución de las presas causada por la caza humana era determinante para explicar su declive histórico y sugería ideas acerca de la mejor manera de recuperar la especie.

Hacia 1993 también había deducido cómo estimar la abundancia de las presas favoritas del tigre (ciervos, jabalíes y bóvidos salvajes) en un área concreta. Empecé con un método de muestreo, ideado por zoólogos estadounidenses, en el que dos oteadores caminan con sigilo a lo largo de los transectos: sendas rectas y estrechas de unos tres kilómetros de largo, que en mi caso abrí en la espesura. Los observadores cuentan todas las presas que ven a lo largo del recorrido y miden la distancia que separa a cada una de ellas de la línea del transecto con un telémetro. A partir de esos recuentos y las distancias medidas es posible estimar el número de presas, contabilizando incluso aquellas que no se advirtieron durante el recuento.

Al revisar mis resultados, los primeros datos de ese tipo recabados en Asia, me asombró la abundancia de ellas en las reservas de Malenad. Estos bosques albergaban ahora entre 16 y 68 ungulados por kilómetro cuadrado (ciervos, cerdos y bóvidos salvajes), una densidad mayor que en las más fértiles sabanas de África Oriental. Era una buena noticia para los tigres: las reservas de la India, aunque relativamente pequeñas en comparación con los parques de Norteamérica o de África, podían sustentar un gran número de felinos grandes. Gracias a esas estimas, los biólogos podrían empezar a predecir cuántos tigres podía acoger en potencia cualquier bosque de Asia.

Pero a mediados de los años noventa, los tigres de las reservas de la India se vieron sometidos a la creciente presión del furtivismo organizado por bandas criminales, surgidas a la sombra de la demanda de partes de su cuerpo por los nuevos consumidores chinos adinerados. Los conservacionistas necesitaban conocer el alcance de su impacto y para ello era preciso censar con precisión las poblaciones clave. ¿Cuántos tigres quedaban realmente? ¿Cuántos se perdían o se ganaban cada año? ¿Fluctuaba de manera natural su número? ¿Variaba su densidad de una región a otra?

A PUNTO PARA SUS PRIMEROS PLANOS

Para dar respuesta a esas preguntas, me propuse identificar y contar tigres con lo que entonces era un método innovador: fotografías tomadas automáticamente por cámaras trampa situadas a lo largo de sendas. Las trampas las disparaban electrónicamente los tigres (y otros animales) al pasar ante ellas. Identificaría cada tigre examinando atentamente las singulares bandas de sus flancos. En comparación con la radiotelemetría, las cámaras trampa me permitirían espiar a muchos más ejemplares. Aun así, era consciente de que solo fotografiarían una fracción de las poblaciones que estudiaba. Para corregir esa limitación, conocida como detección imperfecta, necesitaba estimar el tamaño total de la población a partir del número de animales que iba a fotografiar.

Mi búsqueda del método estadístico apropiado para esta situación me condujo a James D. Nichols, del Centro de Investigación de Vida Silvestre de Patuxent, en Maryland, del Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos. Nichols es experto en los llamados modelos de captura-recaptura, que se

basan en el número de individuos identificables capturados en exámenes repetidos para resolver el problema de la detección imperfecta. Imagine el lector un frasco que contiene canicas del mismo tamaño. Se toman unas cuantas, se las etiqueta y se las devuelve al frasco. Después se toma otro puñado. Algunas estarán etiquetadas, otras no. A partir de la frecuencia de las recapturas de los individuos etiquetados, los modelos pueden calcular la probabilidad media de detectar a cualquier individuo dado y, por ende, el tamaño total de la población.

Tuve que refinar ese modelo genérico para resolver los problemas concretos que planteaban la biología de los tigres y la logística de campo. Mientras que cada canica tiene la misma probabilidad exacta de ser tomada que las demás, no sucede así con los tigres. Puesto que cada individuo tiene diferentes áreas de campeo y recorridos preferidos, las cámaras trampa situadas en una zona determinada difieren en sus probabilidades de captar a cada uno de ellos. Los desplazamientos pueden variar según la estación y la edad y el sexo del animal, con lo que las tasas de captura resultan afectadas. Algunos pueden asustarse por el flash de la cámara y evitarla en la siguiente ocasión. Y, a diferencia de las canicas del frasco, las poblaciones de tigres experimentan nacimientos, muertes y traslados de los individuos: entradas y salidas del área. Tenía que muestrear la población repetidamente, pero debía hacerlo en un corto período de 30 a 45 días para estar seguro de que el número no variaría demasiado. Lamentablemente, muchos estudios caros, basados en el seguimiento de los tigres, ignoran todavía esta precaución y obtienen números inflados.

Mis estudios con las cámaras trampa demostraron que la densidad podía ir desde 0,5 hasta 15 tigres por cada 100 kilómetros cuadrados. ¿Por qué, me preguntaba, varían tanto de un hábitat a otro? En 1967, el zoólogo George Schaller conjeturó a partir de sus observaciones de los tigres del Parque Nacional de Kanha, en la India, que un tigre captura el 10 por ciento de todas las presas disponibles en su territorio. Si, como indicaban mis primeros estudios de telemetría, un tigre mata unas 50 presas al año, entonces necesita que en su territorio haya 500 ungulados para que engendren el número suficiente de ellas para que las pueda devorar. Especulé que las densidades de presas podrían explicar la enorme variabilidad en la densidad de nuestro protagonista.

Para poner a prueba esa idea, entre 1994 y 2003 me aventuré más allá de Malenad para estimar las densidades de tigres y presas en reservas de toda la India, con hábitats diversos que iban desde las marismas de manglar hasta bosques perennifolios. Mis resultados, publicados en 2004, confirmaron la relación predicha de un tigre por cada 500 presas. También respaldaron mi intuición de que la sobrecaza por parte de los lugareños, y no la caza furtiva del tigre para satisfacer la demanda internacional, era la principal culpable de la regresión de su área de distribución en los dos últimos siglos. Haber averiguado la causa principal resultó esencial, porque indicó que la clave para combatir el declive era impedir a los aldeanos que cazaran las presas favoritas del felino con la puesta en marcha de patrullas locales, y no tanto detener a los comerciantes de tigres en lugares remotos.

Sobre la base de estos datos de densidad, amplié el seguimiento de las poblaciones de tigres desde Nagarahole hasta otras reservas importantes de Malenad en 2004. Si los seguimientos con cámaras trampa se repiten un año tras otro, es posible captar los aumentos y descensos de la población, así como el número de individuos que se pierden (por muerte o dispersión) o se ganan (por nacimientos o afluencia). Este conocimiento preciso y en el acto de los cambios demográficos supone el único medio de contar con una auditoría rigurosa de los éxitos y fracasos de los esfuerzos destinados a mantener y recuperar los efectivos de tigres.

La comparación manual de cada nueva instantánea con los miles de fotografías previas para identificar a los individuos era tediosa y lenta. Pero un programa de comparación de patrones llamado ExtractCompare, desarrollado por el matemático Lex Hiby, de Investigación en Conservación, de Inglaterra, me permitió automatizar y acelerar el proceso de identificación desde 2000. (Este versátil programa no solo identifica tigres vivos, sino también pieles decomisadas a los furtivos, lo que es sumamente útil para condenar a los culpables.)

Veinticinco años de cámaras trampa en Malenad han creado una de las mayores bases de datos fotográficas sistemáticas de tigres salvajes, con un registro de 8843 fotografías de 888 felinos. En cada estación superviso unos 250 tigres concentrados en reservas que en su conjunto ocupan unos 4000 kilómetros cuadrados. Algunos aparecen un año tras otro en los seguimientos, mientras que la mayoría son detectados solo en una o dos estaciones, lo que indica elevadas tasas de renovación en la población. Los 400 a 450 tigres que deambulan por Malenad sean posiblemente la mayor del mundo en este momento. Mis observaciones indican que aquí hay ahora cinco veces más que hace medio siglo, todo un tributo al esfuerzo de los Gobiernos locales y los conservacionistas.

Conocer el total de tigres en libertad, si es que logramos obtener un recuento preciso, tal vez no sea importante

Los resultados de estos estudios a largo plazo han demostrado por primera vez la dinámica natural de las poblaciones saludables de tigres. Si gozan de una buena protección, como la de Nagarahole, no son estáticas. Sus densidades fluctúan de manera natural desde unos valores bajos de siete felinos por 100 kilómetros cuadrados hasta valores de 15 por esa superficie a lo largo de períodos dilatados. Incluso una población con tan alta densidad pierde en promedio cada año el 20 por ciento de sus miembros. La violencia natural (la muerte de cachorros a manos de los machos, las heridas sufridas en las peleas y la caza, seguidas de la muerte por hambre) inflige pérdidas sustanciales. Las muertes a manos de granjeros que defienden su ganado y de furtivos que comercian con sus partes en el mercado negro (actividades que incluso tienen lugar alrededor de las reservas protegidas) engrosan las tasas de mortalidad. Pero como en estas reservas las presas son abundantes, la natalidad compensa de sobra tales pérdidas. Los felinos excedentes se intentan dispersar y establecerse en zonas nuevas. Estos hallazgos significan que, en lugar de preocuparnos por la muerte de individuos, como hacen a menudo los conservacionistas, nuestro objetivo debiera ser centrarnos en las poblaciones en su conjunto. En lugar de empeñar nuestros limitados recursos en conjurar todas las amenazas a las que se enfrentan en toda su área de distribución, debiéramos centrar nuestro esfuerzo en sostener aquellas poblaciones con el mayor potencial de recuperación y expansión.

VISIÓN DE CONJUNTO

Durante la década de los noventa y principios de los años 2000 me centré en comprender de qué manera funcionan las poblaciones fuente de los tigres y cómo les afecta la presión humana. Pero estas poblaciones relativamente seguras se hallan instaladas en parajes más amplios que son menos adecuados para la especie. ¿Qué les ocurre a los tigres que viven no en las reservas que albergan las poblaciones fuente, sino en los «paisajes sumidero», así llamados porque absorben el excedente de felinos concebido por las poblaciones reproductoras?

Mis fotografías con cámaras trampa en Malenad revelaban dispersiones a gran distancia de tigres que acababan de alcanzar la edad adulta: el macho BDT-130 migró más de 180 kilómetros desde Bhadra para alcanzar Anshi-Dandeli en 2008; otro, BPT-241, se desplazó más de 280 kilómetros desde Bandipur hasta los bosques del distrito de Shimoga en 2011. Otros muchos viajaron entre reservas adyacentes. Estos datos indican que los paisajes sumidero son puntos de encuentro para los ejemplares procedentes de diversas poblaciones fuente, que con su apareamiento contribuyen a mantener una saludable diversidad genética. Así, un aspecto importante a la hora de sostener las poblaciones fuente es mantener la conectividad de los hábitats mediante tales paisajes, que facilitan la dispersión.

A fin de obtener una imagen más completa del lugar donde viven, decidí ampliar mi estudio y supervisar extensiones que superasen los 4000 kilómetros cuadrados. Pero los estudios con cámaras trampa que funcionaron bien en las reservas pequeñas resultaron poco prácticos y caros en áreas tan grandes. Los estudios a tamaña escala han de recurrir necesariamente a métodos de búsqueda indirectos basados en el rastro de su actividad y no en los propios felinos, es decir, huellas y heces que permitan determinar dónde están, pero no cuántos hay.

En 2006 inicié una inspección de ocupación del hábitat a través de señales de tigres en todo Malenad, una extensión de 38.350 kilómetros cuadrados. Los resultados mostraron que la especie habitaba alrededor de 14.076 kilómetros cuadrados, el 66 por ciento de los 21.167 kilómetros cuadrados de hábitat adecuado de que disponía, lo que significa que cuenta con mucho margen para prosperar. Además, hallé que las áreas que tenían las densidades más altas también tenían densidades más altas de presas y eran poco frecuentadas por el hombre, lo que refuerza la idea de que una clave para salvar al tigre es que los cazadores no compitan con él por las presas.

En la actualidad, en una colaboración entre el Programa de la India de la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre y el Instituto de Estadística de ese país, mi grupo exploró la manera en que la abundancia de tigres en las reservas, medida con métodos intensivos y caros como las cámaras trampa, puede integrarse con los datos más baratos procedentes de la supervisión de heces y huellas propias de parajes más extensos para obtener mejores estimas de su abundancia en regiones más vastas o en países enteros. Esperamos que el trabajo redunde en nuevos conocimientos que mejoren el porvenir del tigre en toda su área de distribución.

ESPECULACIÓN PELIGROSA

Hoy en día se emplean modelos de captura-recaptura fotográfica y de ocupación a gran escala para estimar el número y el área de distribución de los tigres en varios países de Asia. (Los científicos que estudian otros carnívoros esquivos con marcas corporales únicas, entre ellos el licaón africano y el glotón, emplean también estos métodos.) Pero en conjunto, si bien la ciencia de la evaluación de las poblaciones de tigres ha progresado mucho, su adopción por las agencias de conservación gubernamentales y no gubernamentales no lo ha hecho, ya sea porque no entienden los nuevos métodos o no se sienten cómodos con ellos, ya sea porque los métodos antiguos hacen lucir mejor sus esfuerzos.

Un ejemplo reciente ilustra lo artero que resulta fiar en instrumentos anticuados. En abril, el WWF y el Foro Global del Tigre anunciaron con gran alharaca que finalmente la población de tigres salvajes del planeta estaba aumentando, con un total de 3890 individuos. Estos grupos pretenden aumentar su número hasta 6000 en 2022. Pero su recuento, basado en estimas oficiales, fiaba en metodologías discutibles, entre las que se cuentan el uso de extrapolaciones poco fiables desde el punto de vista estadístico a partir de fotografías de ejemplares y de recuentos de heces y huellas en el campo. Y su objetivo demográfico excede con mucho el que cabría esperar a tenor de los estudios realizados con las técnicas rigurosas que aquí se han descrito. Además, aparte del aumento de sus efectivos en contadas reservas de la India y ciertas partes de Tailandia, no existen datos convincentes que prueben que el tigre se está recuperando en el resto del sudeste de Asia o de Rusia. En realidad, países como Camboya, Vietnam y China han perdido en los últimos años sus poblaciones viables, pérdidas que quedan enmascaradas por las estimas globales.

Las cifras especulativas sobre el número de tigres en países y regiones socavan los esfuerzos para salvarlos porque distraen a los conservacionistas y al público de lo que debiera ser nuestra prioridad máxima: salvaguardar y hacer crecer las poblaciones fuente. En cierto sentido, el total de tigres en libertad, si es que logramos un recuento preciso, puede no ser importante. Las poblaciones fuente son las que hemos de supervisar con mayor esmero, utilizando la mejor ciencia posible para conocer su número. Solo con recuentos fiables podremos fijar metas realistas, concebir estrategias adecuadas para conseguirlas y evaluar el impacto de nuestros esfuerzos de conservación.

La historia demuestra que el avance científico puede quedar estancado décadas o incluso siglos por la incomprensión, la inercia institucional o las intrigas políticas. Pero como sea que el mundo se halla en los inicios de la sexta extinción biológica en masa, no podemos permitirnos divorciar las prácticas de conservación de la buena ciencia, si es que hemos de tener alguna esperanza de salvar a un símbolo de la fauna como el majestuoso tigre. IyC

PARA SABER MÁS

Tigers and their prey: Predicting carnivore densities from prey abundance. K. Ullas Karanth et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 101, n.º 14, págs. 4854-4858; 6 de abril de 2004.

An examination of index-calibration experiments: Counting tigers at macroecological scales. Arjun M. Gopalaswamy et al. en *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 6, n.º 9, págs. 1055-1066, septiembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La senda del marfil. Samuel K. Wasser, Bill Clark y Cathy Laurie, en *IyC*, enero de 2010.

El jaguar: genes y conservación. Manuel Ruiz García, en *IyC*, junio de 2013.

por Josh Fischman

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Las medusas, unas nadadoras excelentes

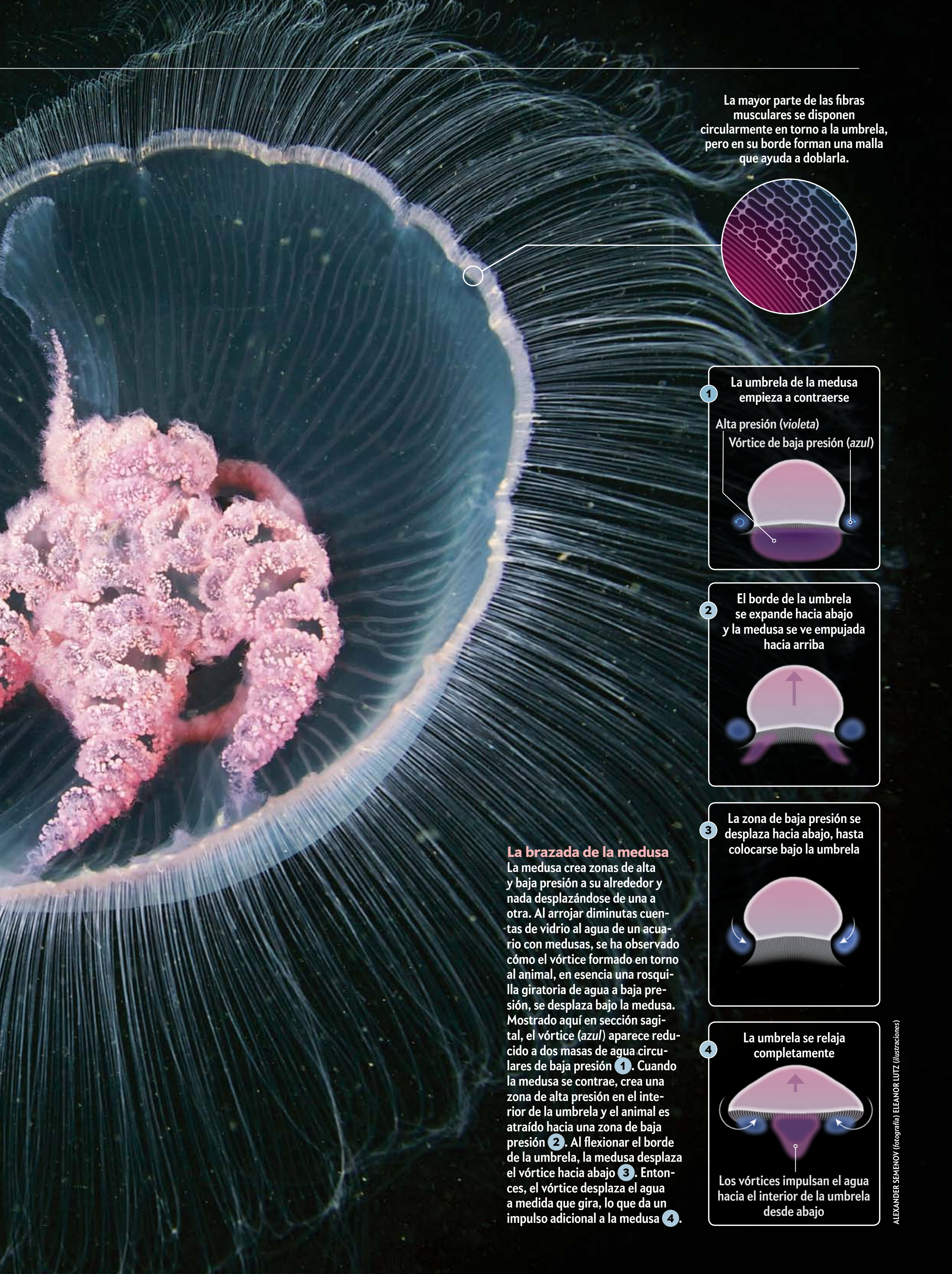
Estos animales se desplazan con una enorme eficiencia al crear zonas de alta y baja presión alrededor de su cuerpo

Las medusas nadan de forma incesante por el agua en busca de crustáceos y larvas de peces que les sirven de alimento, recorriendo varios kilómetros cada día. Son más eficientes que ninguna otra especie acuática, pues para nadar emplean menos energía, en relación con su tamaño, que los elegantes delfines o los incansables tiburones. «El coste de transporte de las medusas, medido como el oxígeno consumido para desplazarse, es un 48 por ciento inferior al de cualquier otro animal que nade», afirma Bradford J. Gemmell, biólogo marino de la Universidad del sur de Florida. Al estudiar la medusa común (*Aurelia aurita*), él y otros investigadores han descubierto que dicha eficiencia se debe a la creación de zonas de alta y baja presión alrededor del cuerpo del animal, que lo succionan y empujan de forma alterna.

Antes se creía que las medusas se desplazaban con tanta facilidad gracias a su ligereza, pues están compuestas básicamente de agua. Pero esta tiene masa y debe desplazarse. Para estudiar sus movimientos, Gemmell y sus colaboradores colocaron medusas en un acuario y añadieron al agua diminutas cuentas de cristal. Al iluminarlas con un láser, pudieron emplear cámaras de alta velocidad para filmar sus desplazamientos y visualizar así la velocidad y la presión del agua en torno al animal. Cuando este contraía la umbrela (la cúpula que forma la mayor parte de su cuerpo), elevaba la presión en su interior y la reducía a su alrededor. Como los objetos se desplazan desde las zonas de alta a las de baja presión, ello impulsaba a la medusa hacia adelante, según publicaron los investigadores en *Nature Communications* en 2015.

Sin embargo, aquel no era el único mecanismo implicado en la natación. Al relajar el borde de la umbrela y dilatar su base, el agua sometida a presión situada bajo el animal penetraba en el interior de la umbrela, lo que proporcionaba a la medusa un segundo impulso. Para realizar estos movimientos, la medusa necesita doblar la umbrela arriba y abajo. La mayor parte de los músculos de las medusas se disponen en bandas circulares, apiladas en torno a la umbrela como si fueran bandas de goma cuya disposición resulta perfecta para estrujarla. Pero recientemente se han descubierto otros músculos que forman un retículo en el borde de la umbrela. Al doblarse este, el agua se mueve alrededor de la medusa, lo que la convierte en una nadadora muy eficiente.





La brazada de la medusa

La medusa crea zonas de alta y baja presión a su alrededor y nada desplazándose de una a otra. Al arrojar diminutas cuentas de vidrio al agua de un acuario con medusas, se ha observado cómo el vórtice formado en torno al animal, en esencia una rosquilla giratoria de agua a baja presión, se desplaza bajo la medusa. Mostrado aquí en sección sagital, el vórtice (*azul*) aparece reducido a dos masas de agua circulares de baja presión (1). Cuando la medusa se contrae, crea una zona de alta presión en el interior de la umbrela y el animal es atraído hacia una zona de baja presión (2). Al flexionar el borde de la umbrela, la medusa desplaza el vórtice hacia abajo (3). Entonces, el vórtice desplaza el agua a medida que gira, lo que da un impulso adicional a la medusa (4).

ALEXANDER SEMENOV (*fotografía*) ELEANOR LUTZ (*ilustraciones*)

por Francisco José Soler Gil



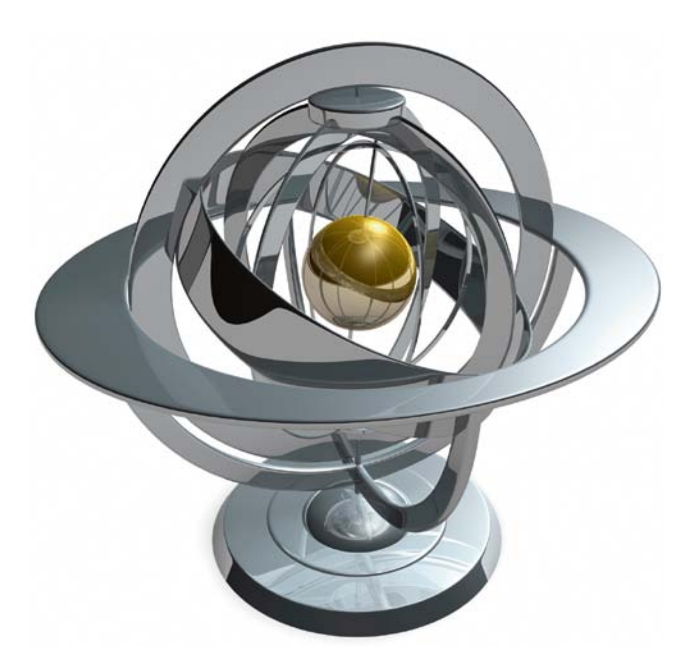
Francisco José Soler Gil es investigador Ramón y Cajal en la Universidad de Sevilla y miembro del grupo de investigación en filosofía de la física de la Universidad de Bremen.

La frontera filosófica de la cosmología moderna

La cosmología es la disciplina física que guarda una mayor frontera común con la filosofía. Trazar un mapa completo de las líneas de intercambio entre ambas sigue siendo, sin embargo, una tarea pendiente

La cosmología de nuestro tiempo, es decir, el estudio del universo considerado como un sistema físico ordinario, cumplirá su primer centenario dentro de pocos meses. Su nacimiento suele datarse en un famoso artículo publicado por Albert Einstein en 1917, donde el físico alemán aplicaba su recién formulada teoría de la relatividad general al universo como un todo. En las últimas décadas, la cosmología se ha convertido en una disciplina vigorosa y con buena reputación dentro de la física. Sin embargo, en todo este tiempo no ha perdido su carácter de comarca fronteriza con, al menos, tres ámbitos relacionados entre sí: el tecnológico, el teórico y el filosófico.

En primer lugar, podemos hablar de los límites de la cosmología en un sentido tecnológico: el alcance de los mejores instrumentos y técnicas de análisis señala una barrera —afortunadamente móvil, al menos hasta ahora— en la adquisición de la información empírica imprescindible para desarrollar y poner a prueba las teorías. Por otro lado, lo anterior implica una brumosa línea de indefinición teórica, generada por la falta de datos que permitan discriminar entre las diferentes teorías y modelos en disputa (como, por ejemplo, los relativos a los primeros instantes del universo). Por último, la presencia de modelos teóricos alternativos entre los cuales no es fácil decidir por medios puramente empíricos nos obliga a acudir a todo nuestro arsenal de ideas y, a fin de buscar pistas que nos permitan formular y reconocer los modelos más prometedores, rebuscar entre todo lo que hemos llegado a pensar y a creer sobre el carácter de la naturaleza y sobre las teorías que tratan de describirla. Y, al obrar así, la cosmología camina con frecuencia sobre la frontera misma entre la física y la filosofía.



Existen poderosas razones de fondo que permiten defender que la cosmología es, hoy por hoy —y cabe decir que conservará siempre este estatus—, la disciplina física que guarda una mayor frontera común con la filosofía. A continuación mencionaré algunas.

Para empezar, el carácter único del universo nos impide distinguir con claridad qué leyes de la naturaleza son fundamentales y cuáles se deben simplemente a las condiciones iniciales o de contorno del universo. Esta situación constituye un problema, sobre todo si nos planteamos la posibilidad de que nuestro universo no sea más que un dominio particular de otra unidad física mayor (alguna forma de multiverso). En semejante contexto, el estudio del origen de nuestro mundo requeriría conocer las leyes físicas fundamentales de ese marco mayor en el que se origina. Pero, puesto que no podemos distinguir empíricamente qué aspectos de las leyes de la naturaleza son fundamentales y cuáles se deben a las condiciones de contorno, no parece haber otra alternativa para explorar la cuestión que la de una apuesta a priori basada en algún tipo de consideraciones filosóficas sobre las características esenciales de la naturaleza; por ejemplo, sobre el carácter cuántico de las leyes fundamentales o sobre el carácter aleatorio de las condiciones iniciales del universo.

Por otra parte, el estudio del universo como un todo nos sitúa ante un objeto que tal vez se extienda espacialmente mucho más allá del límite desde el que resulta físicamente posible recibir información, y temporalmente hacia el futuro en escalas de duración incomparablemente mayores que todo el tiempo transcurrido hasta ahora. Añádase que, muy posiblemente, el universo atravesó en el pasado por fases en las que las condiciones de

temperatura y energía eran muy distintas de las que podemos reproducir en el laboratorio o incluso de las que podemos observar en cualquier fenómeno astrofísico. Todo ello convierte a la cosmología en la disciplina física con las extrapolaciones más arriesgadas, tanto en el espacio y el tiempo como en la escala energética. Extrapolaciones que afectan, entre otras cuestiones, a la validez de las leyes físicas conocidas y al comportamiento esperado de la materia en condiciones energéticas no observables. Al igual que el caso anterior, como único fundamento posible de tales extrapolaciones se hace preciso recurrir a argumentos filosóficos sobre el comportamiento esperable y no esperable de los fenómenos naturales.

Pero, además, la cosmología es un campo en el que la ciencia moderna entra en contacto con preguntas que han interesado a la humanidad desde tiempos inmemoriales: cuestiones como las propiedades y las fronteras del tiempo y del espacio; los orígenes y los fines últimos de la naturaleza; el lugar del ser humano en el orden cósmico, y otras del mismo tenor. Al ocuparse de tales enigmas, el cosmólogo se encuentra sometido con especial intensidad al peso de la historia del pensamiento, y, muy en particular, a la influencia de los distintos arquetipos y esquemas cosmológicos recurrentes, como el de los universos cíclicos, el del caos primigenio o el del eterno retorno, los cuales ejercen desde hace milenios una fascinación innegable y que dan lugar, hoy también, a determinadas preferencias a la hora de elaborar modelos o de seguir líneas de investigación.

Por estas y otras razones, puede afirmarse que la cosmología de nuestro tiempo constituye una disciplina apasionadamente híbrida entre la física y la filosofía. Sin embargo, tal vez lo más sorprendente sea que este hecho ha pasado más bien desapercibido durante décadas. Es cierto que, ya en la segunda mitad del siglo XX, un analista de la ciencia tan agudo como Karl Popper se refirió a la cosmología como «la más filosófica de todas las ciencias». Pero han tenido que ser trabajos muy recientes, como los del físico teórico George Ellis o los del historiador de la ciencia Helge Kragh, los que han despertado finalmente el interés por los múltiples puntos de interacción entre la cosmología y la filosofía.

Esa interacción procede hoy en ambas direcciones. Por una parte, hay supuestos filosóficos generales sobre el modo de ser del mundo que, en la elaboración de los modelos cosmológicos, desempeñan un papel importante en forma de postulados. Por otra, de los modelos cosmológicos pueden también extraerse consecuencias para las cosmovisiones filosóficas actuales. En un texto breve como este no es posible detallar tales líneas de intercambio; sin embargo, sí pueden enunciarse algunas que el lector encontrará si se decide a explorar esta comarca fronteriza.

> La cosmología hace contacto con preguntas que han interesado a la humanidad desde tiempos inmemoriales. Por ello, el cosmólogo se encuentra sometido con especial intensidad al peso de la historia del pensamiento

Algunos supuestos, ideas y debates de carácter filosófico sobre el modo de ser de la naturaleza que desempeñan un papel en la construcción de los modelos cosmológicos, son, por ejemplo, los siguientes: el supuesto de la simplicidad del universo a gran escala; el supuesto de que no ocupamos ningún lugar especial en el cosmos; los debates en torno a si los infinitos pueden o no pueden darse realmente en la naturaleza; o los debates en torno a la estaticidad o carácter evolutivo de la naturaleza a gran escala.

Por ejemplo, la antigua idea de que, en sus rasgos generales, el universo debería ser muy simple se plasma en la cosmología moderna en forma del «principio cosmológico»: este afirma que, a grandes escalas, el universo es espacialmente homogéneo e isótropo. Aceptarlo es una opción filosófica, ya que no puede decidirse empíricamente. Es cierto que el universo observable (la parte del universo de la que podemos recibir información) presenta ese aspecto cuando lo consideramos en bloques de unos 100 megapársecs de lado o más. Sin embargo, y como tantas veces en cosmología, el problema aparece cuando intentamos justificar la extrapolación de tales resultados a regiones situadas mucho más allá de lo que podemos observar.

Si atendemos ahora a la dirección contraria, encontraremos que también de la reflexión sobre los modelos cosmológicos vigentes pueden extraerse importantes consecuencias y temas de estudio para la filosofía de la naturaleza. Entre ellos, el carácter de objeto ordinario que parece presentar el universo; la existencia de una racionalidad y orden global en el cosmos; la capacidad humana para describir la realidad natural, incluso a esa escala global; las particularidades teleológicas que —al menos en apariencia— presentan las leyes y las constantes de la naturaleza (el llamado «problema del ajuste fino» de dichas leyes y constantes); o el debate sobre el significado de la infradeterminación de los modelos cosmológicos por su base empírica.

Podríamos intentar completar este listado con otras cuestiones de indudable interés. Pero, aun así, estaríamos todavía muy lejos de haber trazado con ello un mapa completo de los temas filosóficos de la cosmología. En realidad, ese mapa no existe: aún no disponemos de un compendio que pueda presumirse más o menos completo de las líneas de interacción entre la física y la filosofía que emergen en esta apasionante comarca fronteriza que constituye la cosmología actual. El lector interesado podrá encontrar algunos tanteos preliminares en la bibliografía recomendada al final de este artículo, pero la situación es todavía muy dinámica —afortunadamente— en esta joven disciplina. Parece que aún tendrá que transcurrir mucho tiempo hasta que se agoten las sorpresas y comience el período de cristalización de la filosofía de la cosmología en obras de referencia clásicas. IyC

PARA SABER MÁS

Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Albert Einstein en *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*. Parte 1, págs. 142-152, 1917.

Cosmology and controversy. Helge Kragh. Princeton Academic Press, 1996.

Issues in the philosophy of cosmology. George Ellis en *Handbook in the philosophy of science: Philosophy of physics, part A*, dirigido por Jeremy Butterfield y John Earman, Elsevier, 2007. Disponible en **arxiv.org/abs/astro-ph/0602280**

La cosmología en el siglo XXI: Entre la física y la filosofía. Juan Arana et al. Publicacions Universitat Rovira i Virgili, 2012.

El universo a debate. Francisco José Soler Gil. Biblioteca Nueva, 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Física y filosofía. Francisco José Soler Gil en *IyC*, julio de 2013.

por Clive R. Neal



Clive R. Neal, profesor de geología en la Universidad de Notre Dame, investiga el origen y evolución de la Luna. Recientemente ha presidido el comité de revisión de las misiones espaciales prolongadas de la División de Ciencia Planetaria de la NASA.

La importancia de regresar a la Luna

Serviría para crear una estación de paso hacia Marte e impulsaría la industria

Hace unos meses, cuando el director general de la Agencia Espacial Europea (ESA), Johann-Dietrich Wörner, manifestó su intención de abanderar el establecimiento de una base lunar internacional, experimenté una sensación de *déjà vu*. En enero de 2004, el presidente George W. Bush anunció su propia «Visión para la exploración espacial», según la cual EE.UU. lideraría el retorno a nuestro satélite. Una vez allí, y después de que los humanos aprendiéramos a vivir y a trabajar satisfactoriamente en otro mundo, pondríamos rumbo a Marte, el destino último.

La inspiradora idea de Bush propició que no menos de 14 agencias se sumaran a participar en esa iniciativa. Por desgracia, la implementación del plan adolecía de graves defectos. La NASA intentó revivir los días de gloria del Apolo centrándose en vehículos no reutilizables que transportarían a la Luna todo el material necesario desde la Tierra. Pero el programa Apolo, aunque supuso un logro fantástico, no era sostenible, lo cual motivó en parte que el presidente Richard M. Nixon lo cancelara en 1972. La visión de Bush también demostró que era demasiado cara para hacerla realidad, y en 2010 el presidente Barack Obama declaró que EE.UU. no tenía ninguna necesidad de volver a la Luna, alegando, en esencia, que eso pertenecía al pasado, que ya habíamos estado allí. Afirmó que, en su lugar, viajaríamos a Marte sin dar ese paso intermedio.

Sin embargo, el regreso a la Luna es de crucial importancia para el futuro de la exploración espacial humana, y no solo por la experiencia que nos brindaría vivir en un entorno extraterrestre. Nuestro satélite también es rico en recursos, especialmente hielo, el cual puede descomponerse por electrolisis en hidrógeno y oxígeno. Estos elementos se emplearían en pilas de combustible y en la producción de propelentes líquidos para cohetes. Si al final nos dirigimos a Marte (o a cualquier otro sitio), cargar todo ese combustible desde la superficie terrestre resultaría tremendamente ineficiente. Convendría más efectuar el lanzamiento desde la Luna, donde la gravedad es seis veces menor.

El regreso a la Luna también inspiraría a las próximas generaciones e impulsaría avances en tecnología, igual que hizo el programa Apolo, pero lo haría de una manera sostenible y escalonada. Los contribuyentes necesitan ver los frutos de la inversión en esta empresa, y no solo en forma de adelantos tecnológicos. Una estación de repostaje para naves espaciales que orbitara alrededor de la Luna, se abasteciera con combustible refinado a partir de recursos lunares, estuviera operada por entidades privadas y vendiera sus productos a varias agencias espaciales constituiría una vía para atraer la Luna a nuestra esfera de influencia económica. Tales actividades podrían traducirse en una importante reducción de la masa de lanzamiento desde la superficie de la Tierra y, por lo tanto, en un abaratamiento del coste de las misiones espaciales. Además, tendría el potencial de crear un buen número de industrias que, a su vez, generarían empleos especializados y bien remunerados.



El paso inmediato en la exploración lunar debería consistir en el envío de prospectores robóticos a la superficie para definir la extensión, la forma, la distribución y la facilidad de extracción y refinamiento de aquellos recursos identificados desde la órbita. Un esfuerzo internacional conjunto facilitaría esta etapa crítica. La NASA está preparando una misión de prospección de recursos, pero el presupuesto es tan reducido que podría cancelarse en cualquier momento. Los rusos, en asociación con la ESA, también están desarrollando el proyecto Luna-Resurs. Y no olvidemos China, que en 2013 se convirtió en la tercera nación que alunizó con éxito. Los chinos planean traer muestras lunares a la Tierra en los próximos años, siguiendo la estela de EE.UU. y Rusia.

En la actualidad, la estrategia estadounidense para la exploración espacial humana se basa en el uso de un vehículo robótico para capturar una roca de un asteroide, de unos pocos metros de diámetro, y situarla en una órbita estable alrededor de la Luna. Los astronautas explorarán entonces dicha roca y recogerán muestras como práctica para un futuro viaje al planeta rojo. Pero la denominada Misión de Redirección de Asteroides (ARM, por sus siglas en inglés) no tendrá aplicación en Marte, debido en gran medida a que trabajar en microgravedad es muy distinto a trabajar en la superficie de un planeta. Así que, básicamente, se trata de una vía rápida a ninguna parte.

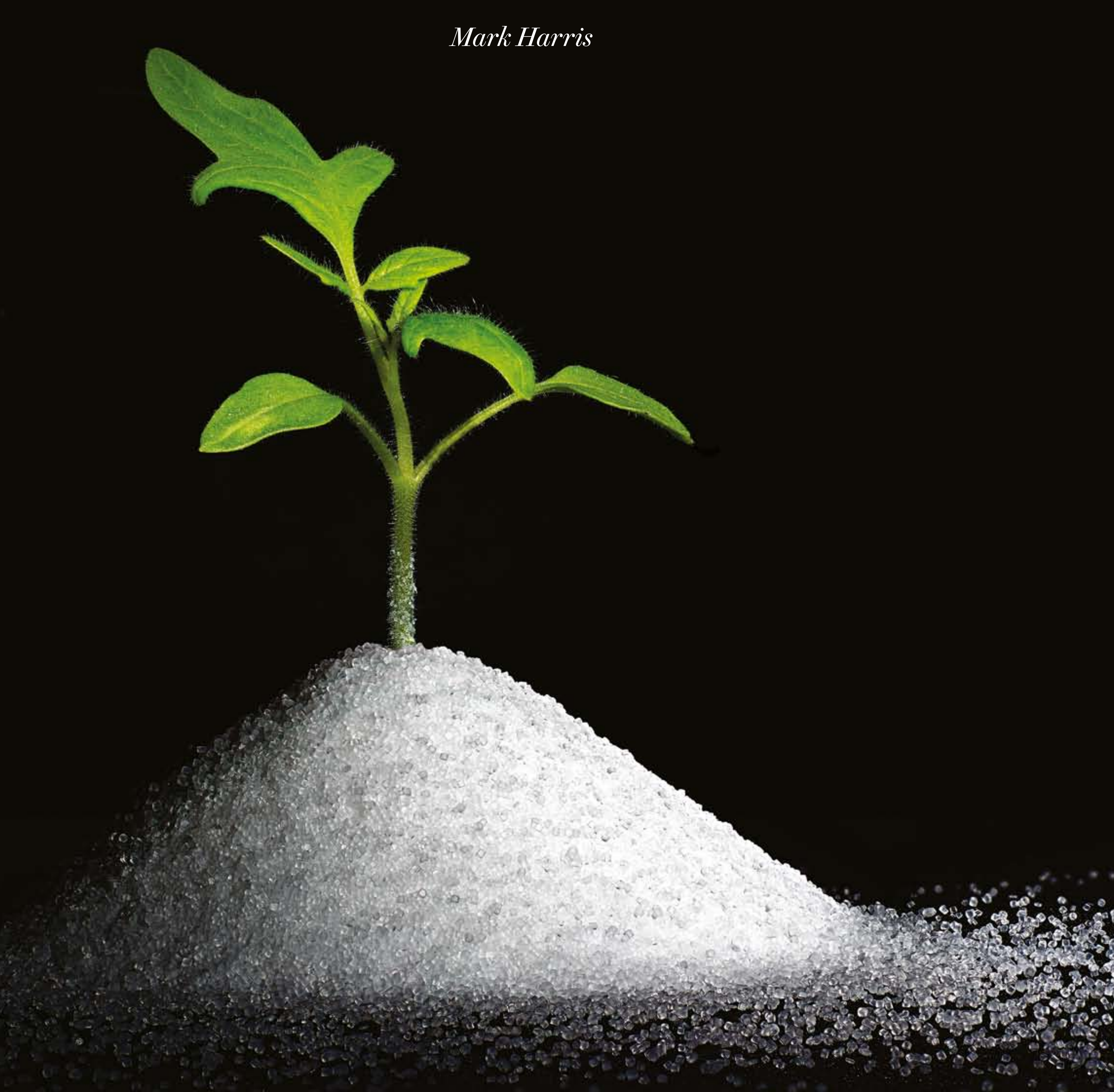
Lo cual nos conduce de nuevo a la Aldea Lunar de Wörner, que la comunidad espacial internacional aplaudió cuando se presentó en diciembre del año pasado en el simposio «Luna 2020-2030», organizado por la ESA. Por el momento, EE.UU. se mantiene al margen, observando los movimientos de los demás países. Sí, Marte es el destino último, pero EE.UU. ha trazado mal la ruta para llegar a él. La Luna representa el activo que lo facilitaría, la clave para alcanzar esa meta. Se necesita redefinir la manera de encarar la exploración espacial de un modo tal que el dinero que se gaste en viajes espaciales se vea como una inversión de futuro.

GETTY IMAGES

CULTIVOS RESISTENTES A LA SAL

El agua salada está destruyendo las tierras de cultivo. El arroz y las frutas genéticamente modificados para soportar la sal podrían ofrecer una solución y alimentar a millones de personas

Mark Harris



ERIC REY SACA DE SU MALETÍN UN RECIPIENTE DE PLÁSTICO MEDIO LLENO DE arroz cocido. Los gruesos granos marrones tienen un aspecto normal. Huelen como el arroz corriente. Cuando me llevo un puñado de granos a la boca, no saben a otra cosa que a arroz: suaves, chiclosos y algo insípidos. Me asalta la tentación de tomar un frasco de salsa de soja y salarlo un poco, aquí donde me encuentro, en la cocina de las oficinas de Arcadia Biosciences, en Seattle (empresa de biotecnología de la que Rey es director ejecutivo).

Mi deseo de acentuar el sabor es algo extraño porque este arroz se ha cultivado en un terreno tan salado que mataría a la mayoría de vegetales. La planta fue modificada genéticamente para soportar esas condiciones, a imagen de unas plantas peculiares denominadas halófitas, que medran a sus anchas en litorales y marismas costeras. Me sorprende que los granos no me hagan curvar la lengua. Hago una cata de sabor a ciegas y los comparo con arroz no modificado y cultivado en agua dulce: no percibo diferencia.

«El arroz es el cultivo más valioso del mundo», en términos del volumen cosechado en 2012, asegura Rey, pero «en algunas partes de China, donde la salinidad no cesa de aumentar, ya no se puede cultivar nada». Rey cree que los nuevos conocimientos sobre los genes que ayudan a las halófitas a soportar las altas concentraciones de sal, combinados con los modernos métodos biotecnológicos para insertar esos genes en el arroz y otras plantas, podría ser la clave para alimentar a la humanidad.

Casi una cuarta parte de las tierras de regadío sufre la salinización del suelo a causa de las malas prácticas de riego. El aumento del nivel del mar también amenaza a decenas de millones de hectáreas de cultivos por la infiltración del agua salada. Si en esas regiones salobres se pudieran obtener buenas cosechas, sería posible alimentar a decenas de millones de personas más, un paso vital para asegurar el sustento de los dos mil millones de nuevas bocas que según las previsiones poblarán la Tierra a mediados de siglo.

No es ninguna quimera, afirma Eduardo Blumwald, botánico de la Universidad de California en Davis, cuyo trabajo constituye la base del arroz Arcadia. «Creo que ya es viable cultivar en agua reciclada y salobre de baja calidad, incluso en agua de mar diluida», opina. A unos 1100 kilómetros al sur de Seattle, los invernaderos de Blumwald en esa universidad están repletos de plantas de arroz de un color verde esmeralda, que crecen con vigor en estanques someros de agua salada. Él y algunos otros expertos de todo el mundo están transfiriendo genes de las plantas halófitas que toleran la sal a plantas de cultivo corrientes, no solo arroz, también trigo, cebada o tomates. (También se estudia el algodón.)

Sin embargo, para que estas semillas de la salvación arraiguen, tendrán que salir de los invernaderos y demostrar que pueden crecer bien expuestas a las tormentas, las sequías y los insectos dañinos. También tendrán que resistir la avalancha de dudas e inquietudes relacionadas con la seguridad y con la legislación que sacarán a relucir políticos, científicos y agricultores.

Por mucho que las plantas sean exquisitas, la ingeniería genética dejará un mal sabor de boca a quienes temen que los genes puedan ser transferidos a otros organismos, con efectos inesperados. Este tipo de proyectos, según los críticos, exponen a algunos de los pueblos más pobres y vulnerables del planeta a esas incertidumbres. Por otra parte, Janet Cotter, asesora ambiental, señala que la creación de alimentos cultivables en condiciones de salinidad promueve prácticas de riego más deficientes. «Si fomentas las prácticas de riego inadecuadas, inicias un círculo vicioso insostenible», advierte.

UN CUENTO SALADO

Las halófitas, «plantas de sal», sobreviven en aguas cuya salinidad va desde la de un *bloody mary* picante

EN SÍNTESIS

Casi una cuarta parte de las tierras agrícolas están afectadas por el aumento de la salinidad del suelo, que mata las plantas.

Los genetistas han ideado soluciones para modificar el arroz y los tomates con genes que mejoran su tolerancia a la sal.

Esas plantas podrían nutrir a millones de personas y salvar las explotaciones agrarias, pero a sus detractores les preocupan los efectos imprevistos de las modificaciones genéticas.

TOMATERA FACILITADA POR JAN HICKCOX, MARILYN HOCK Y MARCH FARMS, DE BETHLEHEM, CONNECTICUT, EE.UU.; PLAMEN PETKOV (*fotografía*)

te hasta la del agua de mar. Los manglares son halófitos. Las plantas de esa naturaleza no abundan y suelen tener un aspecto y un sabor nada apetitosos, con protuberancias nudosas, hojas ralas o feas y raíces prominentes.

Los primeros intentos de popularizar las halófitas trataron de abrir mercado promocionando los manglares como material de construcción, las suculentas oleaginosas como fuente de biocarburante y los arbustos tolerantes a la sal como forraje para el ganado. En octubre de 1998, Investigación y Ciencia publicaba un artículo [*véase* «Riego con agua del mar», por Edward P. Glenn, J. Jed Brown y James W. O'Leary] cuyos autores vislumbraban vastas granjas de halófitas en todo el mundo para alimentar a la población. Pero sin un mercado consolidado para ellas, tales granjas estaban abocadas al fracaso.

Cuando Blumwald comenzó a trabajar con las halófitas en los años noventa, la mayoría las consideraba meras curiosidades botánicas. «Casi ningún agrónomo pensaba en la salinidad. Se concentraban en obtener alimentos más grandes, más redondos, más coloreados, más dulces», afirma.

Él, en cambio, se interesó por una proteína llamada antiportador, que acelera el intercambio de iones de sodio (componente de la sal) y de hidrógeno a través de las membranas celulares del vegetal halófito. Cuando la planta absorbe el sodio disuelto en el agua, este altera enzimas, el transporte de agua y, en última instancia, la misma fotosíntesis. Blumwald descubrió que, modificando genéticamente plantas corrientes para que produjeran grandes cantidades de ese antiportador, podía cultivarlas en agua con una tercera parte de la salinidad del agua de mar, con pocos efectos adversos. El antiportador arrastra los iones de sodio hasta las vacuolas, unos espacios cerrados dentro de las células, donde no pueden causar ningún daño. En algunas halófitas, estas vacuolas adquieren tal tamaño que reciben el nombre de vejigas de sal (halocistos). La quinua, una halófita ahora presente en la mesa, posee esas vejigas en forma de pequeñas esferas translúcidas en sus hojas.

Cuando Blumwald aumentó los niveles del antiportador en algunas variedades inglesas tradicionales de tomate, las tomateras crecieron en agua que era «cuatro veces más salada que la sopa de pollo», me asegura. Y produjeron unos tomates rojos, dulces y jugosos, que pesaban más de 100 gramos. Sin embargo, estas creaciones que tan bien crecían en el laboratorio, lo hacían con dificultad al aire libre. «Todo iba bien en el invernadero, donde la humedad relativa es del 40 por ciento o más», explica. Pero a medida que esta disminuye, la planta pierde más agua por las hojas y cierra los estomas (poros) como defensa. Así que el cultivo en el campo es mucho más difícil, señala, «porque la humedad solo ronda el 5 por ciento y el agua escasea».

El problema radica en que la capacidad de expulsar la sal no es el único requisito para crecer bien en el suelo salado. La planta posee miles de genes que intervienen en sus procesos vitales y la ayudan a soportar todo tipo de estrés, como el calor, la sequía o la salinidad. Para crecer en condiciones salinas, la planta precisa disponer de genes que modifiquen su actividad para protegerla cuando las condiciones de crecimiento se hacen difíciles. No hay una solución mágica, dice Simon Barak, profesor de botánica de la Universidad Ben-Gurion del Negev, en Israel, «pero hemos ideado un método de cálculo para cribar esos genes y ver cuáles tienen más posibilidades de contribuir a la tolerancia al estrés».

Barak elaboró una base de datos de genes del estrés recopilando datos de los ensayos publicados sobre *Arabidopsis thaliana* (usada en agronomía como modelo para el estudio de los procesos fisiológicos vegetales). Por medio de análisis estadísticos clasificó la importancia de cada gen para la supervivencia de la planta en condiciones adversas como son las temperaturas altas, y descubrió una serie de candidatos prometedores.

A continuación, su grupo llevó a cabo pruebas de laboratorio con plantas portadoras de las versiones mutadas de esos genes para ver cómo resistían las duras condiciones. Los mutantes que mostraron tolerancia a la sequía, la sal o el calor se apartaron para proseguir con su estudio. «En los procesos clásicos de selección genética se examinan miles de plantas; de todas quizá sean interesantes de un 1 a un 3 por ciento», explica. «Nosotros tuvimos una tasa de éxito del 62 por ciento. Tenemos mutantes suficientes para trabajar hasta la jubilación.»

Otros investigadores también han abordado la supervivencia en medios salinos recurriendo a una combinación de biología, estadística e informática. Hace algunos años, mientras trabajaba en el Instituto de Investigación Química del Mar y la Sal de Gujarat (India), el genetista Narendra Singh Yadav descubrió genes vinculados con la tolerancia salina en otra halófita, la salicornia. No sabía exactamente qué hacían, pero los análisis indicaban que debían ser importantes. Para verificar su teoría, insertó dos de esos genes en el tabaco, un vegetal bastante sensible a la sal. Cuando cultivó las plantas transgénicas en agua con un tercio de la salinidad del agua marina, germinaron mejor, desarrollaron raíces y brotes más largos y crecieron más y más frondosas que otras no modificadas. A pesar de que no se aprecian en ellas vejigas de sal, contienen niveles más bajos de las llamadas especies reactivas del oxígeno, moléculas nocivas que se acumulan en condiciones de estrés salino. Yadav trabaja ahora en Israel con Barak, y su antiguo grupo de investigación en Gujarat persigue conseguir una variedad de algodón tolerante a la sal. «Y creo que hay muchos más genes por descubrir», acaba diciendo.

Lo importante, cree Blumwald, es «ser inteligente sin pecar de optimista estúpido». Su grupo de la Universidad de California en Davis dispone de una docena de invernaderos en los que llevan a cabo experimentos con miles de plantas transgénicas, desde alfalfa y panizo de Daimiel (*Pennisetum*) hasta cacahuetes y arroz. La mayoría son modificaciones de plantas de cultivo comerciales y en cada experimento intentan recrear las condiciones adversas naturales: grandes ventiladores simulan vientos variables, el agua se suministra a intervalos irregulares o en tromba, como sucede en las tormentas, y se esparce sal o se genera calor. «Estoy harto de llevar nuestras plantas al campo y verlas morir», confiesa. «¿Es posible conseguir cultivos que crezcan en agua de mar? No lo creo. Puede ser que crezcan, pero su valor nutritivo será ínfimo. ¿Y en agua de mar diluida o en agua reciclada? Seguramente.»

Mark Harris, periodista científico, obtuvo en 2013 la beca Knight de periodismo científico que concede el Instituto de Tecnología de Massachusetts, y en 2015 fue galardonado por la Asociación Americana para el Progreso de la Ciencia (AAAS). Colabora con varios medios.



FISIOLOGÍA VEGETAL

Tres estrategias contra la sal

Todas las plantas toleran algo de sal (cloruro de sodio) en el suelo. Los iones cloruro y sodio penetran en el interior de las células vegetales y entre los tejidos, pero en altas concentraciones alteran procesos bioquímicos vitales. La mayoría dispone en sus raíces de barreras físicas o químicas que vetan su entrada (A). Pero hay un tipo, las halófitas, que cuentan con una ayuda extra: proteínas capaces de transportar grandes cantidades de iones sodio y cloruro a los espacios de almacenamiento de las células, internos (B) o externos (C). Estos espacios quedan separados de los frágiles mecanismos celulares que regulan el crecimiento y la fotosíntesis. Los científicos intentan incorporar esas proteínas a plantas como el arroz con el fin de mejorar su tolerancia a la sal.

B Confinados en el interior
Los vegetales halófitos pueden hacer frente al exceso de sodio y cloruro aunque los iones alcancen el sistema vascular y lleguen hasta las hojas. *Suaeda maritima*, un arbusto propio de las marismas, posee canales proteicos (*verde*) que conducen los iones hacia las vacuolas de las células, depósitos donde permanecen confinados y alejados de los procesos sensibles de la planta.

Vacuola
Na^+ Cl^-

Oryza sativa
Suaeda maritima
Arabidopsis thaliana

C A raya en el exterior
Para poder vivir en medios con concentraciones altas de sal, algunas halófitas, como la quinua o *Arabidopsis*, recurren a proteínas de transporte especiales, llamadas antiportadoras (*rojo*). La planta se sirve de ellas para desplazar el sodio y el cloruro hasta las vejigas que sobresalen en las hojas o los tallos, expulsando iones de hidrógeno (H^+) a cambio. Otras proteínas (*beige*) ayudan en el proceso.

Vejiga
Antiportador
Simplificado
Na^+ Cl^- H^+

A Método de barrera
La mayoría de las plantas poseen barreras físicas o químicas en sus raíces para mantener en el exterior los iones sodio (Na^+) y cloruro (Cl^-) y dejar entrar el agua. Un ejemplo es el arroz (*Oriza sativa*). Por desgracia, las barreras solo pueden controlar la sal en pequeñas cantidades.

Agua
Raíz
Na^+ Cl^-

TEMORES NATURALES

La modificación genética sigue siendo controvertida en muchos países. Cotter dice: «Nunca estamos seguros de que no resultará afectada otra parte de la planta y de si eso no repercutirá de algún modo en la comida o en la seguridad ambiental». Ella prefiere un sistema de mejora llamado selección asistida por marcadores que se sirve de herramientas genómicas para descubrir los genes de la tolerancia a la sal en las variedades silvestres de las plantas cultivadas, y luego cruza naturalmente ambas, las silvestres y las cultivadas, para reintroducir el gen en estas.

Timothy Russell, agrónomo que trabaja en Bangladés para el Instituto Internacional de Investigación del Arroz, tampoco oculta su escepticismo. «A mi modo de ver, la manipulación genética no supone ningún grave problema, pero es mucho más sencillo comercializar una variedad mejorada convencionalmente», asegura. «Creemos posible lograr una tolerancia a la salinidad bastante buena por medio de las técnicas al uso. ¿Por qué tomar un camino más difícil cuando no es necesario?»

Una buena razón para recurrir a la manipulación genética es su rapidez, argumentan sus defensores. Cruzar, seleccionar y volver a cruzar lleva su tiempo. Probablemente en los próximos cuatro años, las plantas tolerantes a la sal gracias a la ingeniería genética superarán en el mercado a las seleccionadas con métodos convencionales. El arroz halotolerante de Arcadia Biosciences que probé ya se halla en los ensayos finales de campo en la India y probablemente será autorizado en ese país. Produce un 40 por ciento más de grano en agua con una décima parte de sal de la del agua marina, y Rey espera contar con otra nueva variedad que duplique esa tolerancia. «Mejores rendimientos para el agricultor significa más beneficio para él, más beneficio para nosotros y una reducción de la presión que soportan las reservas de agua dulce», dice.

Es un tímido principio, pero Blumwald cree que «es un paso en la dirección correcta. En el futuro, para alimentar a miles de millones de personas no bastará con un avance como este; serán necesarios decenas o cientos». IyC

CHERIE SINNEN

PARA SABER MÁS

Engineering salt tolerance in plants. Maris P. Apse y Eduardo Blumwald en *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 13, n.° 2, págs. 146-150, 1 de abril de 2002.
The development of halophyte-based agriculture: Past and present. Yvonne Ventura et al. en *Annals of Botany*, vol. 115, n.° 3, págs. 529-540, febrero de 2015.
Plant salt tolerance: Adaptations in halophytes. Timothy J. Flowers y Timothy D. Colmer en *Annals of Botany*, vol. 115, n.° 3, págs 327-331, febrero de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Riego con agua del mar. Edward P. Glenn, J. Jed Brown y James W. O'Leary en *IyC*, octubre de 1998.
Aprovechamiento agrícola del agua. Sandra Postel en *IyC*, abril de 2001.



BIOTECNOLOGÍA AGRÍCOLA

CRISPR llega a los cultivos

Una potente herramienta de edición de genes está revolucionando la agricultura y podría transformar el debate sobre los transgénicos y la manipulación genética en general

Stephan S. Hall

OWEN GILDERSLEEVE *(ilustración)*; EMMA TODD *(fotografía)*

Stephen S. Hall es un premiado escritor y periodista científico especializado en biomedicina. Ha colaborado con numerosos medios y es profesor adjunto de periodismo en la Universidad de Nueva York.



PUEDE QUE EL CENTENAR DE AGRICULTORES que atestaban el salón Mendenhall Inn, en Pensilvania, no tuvieran formación sobre edición de genes, pero sí que sabían de setas. Estos productores locales cosechan unos impresionantes 500.000 kilogramos al día en promedio, lo que explica en parte el hecho de que Pensilvania domine el mercado estadounidense, que alcanza los 1200 millones de dólares anuales. Algunas de las setas que producen, sin embargo, se vuelven marrones y se pudren en las estanterías de las tiendas; si uno ha sostenido en la mano una seta viscosa y medio podrida, sabrá por qué nadie las compra. Los hongos son tan sensibles a la agresión física que incluso la cuidadosa recogida y el embalaje «a un solo toque» pueden activar una enzima que acelera su descomposición.

En un seminario sobre setas celebrado el pasado otoño, Yinong Yang subió a la tribuna para anunciar una posible solución al problema del oscurecimiento o pardeamiento. Yang, biólogo y profesor de fitopatología de la Universidad estatal de Pensilvania, había editado el genoma del champiñón común, *Agaricus bisporus*, la seta comestible más popular en el mundo occidental, mediante una nueva herramienta llamada CRISPR.

Los cultivadores de hongos de la audiencia probablemente nunca habían oído hablar de CRISPR, pero comprendieron que era algo importante cuando Yang les mostró una foto de la actriz Cameron Díaz entregando a Jennifer Doudna y Emmanuelle Charpentier, inventoras de la técnica, el premio Breakthrough, acompañado por un cheque de 3 millones de dólares para cada una. Y entendieron las enormes implicaciones comerciales de la invención cuando Yang les enseñó fotografías en las que aparecían setas marrones y podridas al lado de otras de un blanco inmaculado obtenidas con ella. Todas correspondían a *A. bisporus*, la cepa universal que anualmente produce 400 millones de kilogramos de botón blanco, setas cremini y setas portobello. (La Universidad estatal de Pensilvania también se dio cuenta de las implicaciones comerciales; el día antes de la charla de Yang, presentó una solicitud de patente sobre el trabajo de los hongos.)

En sus apenas tres años de existencia, la técnica CRISPR ya ha generado tramas más fascinantes que una novela de Dickens. Es una revolucionaria herramienta de investigación con repercusiones médicas espectaculares que ha originado problemas bioéticos espinosos y una difícil disputa sobre patentes; y sobre todo ello planean intereses económicos de miles de millones de dólares en los ámbitos de la medicina y la agricultura. La técnica ha irrumpido en la comunidad científica como un intenso tornado. Laboratorios académicos y empresas de biotecnología la están empleando para dar con tratamientos novedosos contra enfermedades como la anemia falciforme y la beta-talasemia. También ha despertado críticas porque artistas y bioempresarios han creado con ella de todo, desde conejos de pelaje púrpura hasta *souvenirs* vivos, como los cerdos miniaturizados producidos en China como mascotas. La posibilidad de utilizar CRISPR para reparar embriones o editar nuestro ADN de forma permanente (un proceso conocido como modificación de la línea germinal humana) ha provocado un debate febril acerca de la «mejora» de la especie humana, con el consiguiente llamamiento a una moratoria internacional [*véase* «La cumbre sobre edición genética en humanos concluye con opiniones divergentes», por Sara Reardon; Investigación y Ciencia, febrero de 2016].

La revolución de CRISPR puede estar teniendo su efecto más profundo y menos publicitado en la agricultura. En otoño de 2015 se habían publicado unos 50 artículos científicos que informaban del uso de CRISPR para editar genes en las plantas y hay indicios de que el Departamento de Agricultura de los

EN SÍNTESIS

La herramienta de edición genética llamada CRISPR permite a los científicos alterar el genoma de un organismo con una precisión sin precedentes.

Confiere a las pequeñas empresas agrícolas un enorme potencial para manipular los genes, no solo a las grandes compañías agroalimentarias, ya que es fácil y barata de usar.

Sus defensores sostienen que resulta biológicamente menos perjudicial que las técnicas tradicionales de mejora practicadas durante miles de años. Los reguladores tienden a opinar lo mismo.

Los alimentos CRISPR podrían cambiar el debate sobre los productos genéticamente modificados, o tal vez se los considere la última versión de los alimentos transgénicos.

EE.UU. (USDA), uno de los organismos que evalúan los productos agrícolas modificados genéticamente, pueda considerar que no todos los cultivos obtenidos mediante edición genética exijan la misma atención reguladora que los organismos genomodificados, o transgénicos, «tradicionales». Con esa puerta aún solo ligeramente entreabierta, las empresas están compitiendo para hacer llegar cultivos editados genéticamente a los campos y, en última instancia, a los alimentos.

El aspecto transformador de CRISPR reside en su precisión sin precedentes. La técnica permite inactivar un gen o, con un poco más de esfuerzo, añadir un rasgo deseable mediante la inserción de un gen en un lugar específico del genoma. Ello la convierte, según los que la usan, en la forma menos perjudicial de mejora vegetal que los humanos hemos ideado jamás, incluido el mejoramiento «natural», practicado durante miles de años. También permite eludir, en muchos casos, el controvertido método de insertar ADN de otras especies en plantas; estos cultivos transgénicos, como el maíz y la soja de Monsanto resistentes al herbicida Roundup, despertaron especialmente la ira entre los críticos de los transgénicos y generaron entre la población desconfianza hacia la manipulación genética. Sin embargo, algunos científicos creen con optimismo que los cultivos CRISPR son tan diferentes que harán cambiar el tono del debate sobre los alimentos transgénicos. Según Daniel F. Voytas, académico y empresario científico, la nueva técnica exige que se redefina lo que es un organismo transgénico.

¿Aceptarán los consumidores los cultivos CRISPR? ¿O van a ver en ellos el último ejemplo de «alimentos Frankenstein» (*Frankenfood*), una distorsión genética de la naturaleza en la que un ADN extraño (beneficioso para la agroindustria) es introducido en una especie vegetal con consecuencias impredecibles para la salud y el ambiente? Debido a que solo ahora se está empezando a aplicar CRISPR a los cultivos alimentarios, la cuestión todavía no ha transcendido en la población general, pero lo hará pronto. Agricultores como los productores de setas de Yang serán los primeros en opinar, probablemente en uno o dos años.

Momentos después de la charla de Yang, un científico de la industria le planteó el reto fundamental que suponían los alimentos CRISPR. Convenía con Yang en que las setas mejoradas presentaban retoques mínimos en el ADN, en comparación con los transgénicos tradicionales. «Sin embargo», apuntó el científico, «se trata de una modificación genética, y algunas personas verán que es como si estuviéramos jugando a ser Dios. ¿Cómo podemos lidiar con eso?»

De cómo respondan a esta pregunta Yang y otros científicos que aplican estas técnicas de edición de genes a los cultivos alimentarios puede depender que CRISPR se convierta en una herramienta transformadora o tropiece con la oposición de la población.

PRECISIÓN, AGILIDAD Y BAJO COSTE

El signo revelador de cualquier técnica revolucionaria es la rapidez con la que los investigadores la emplean en sus trabajos. Según esta norma, CRISPR se halla entre las innovaciones más poderosas de la biología del pasado medio siglo. La seta creada mediante edición genética ofrece un ejemplo de ello.

Yang nunca trabajó con champiñones hasta 2013, pero se podría decir que fue criado para la tarea. Nacido en Huangyan, una ciudad al sur de Shangái conocida como la capital de los cítricos de China, trasteó con algunas enzimas primitivas de edición de genes en los años noventa, como estudiante graduado en la Universidad de Florida y más tarde en la de Arkansas. Recuerda vívidamente cuando, el 17 de agosto de 2012, abrió el número de la revista *Science*; contenía un artículo del laboratorio de Doudna en la Universidad de California en Berkeley, y del de Charpentier, en la Universidad de Umeå, que describía el potencial de CRISPR para editar genes. «¡Esta es la buena!», pensó. A los pocos días, ya estaba incubando planes para mejorar rasgos en plantas de arroz y patata mediante la edición de genes. Publicó su primer artículo sobre CRISPR en verano de 2013.

No fue el único en darse cuenta. Los biólogos vegetales se subieron al carro de CRISPR en cuanto se publicó la técnica. Los científicos chinos, que la adoptaron rápidamente, conmocionaron a la comunidad agraria en 2014, cuando la emplearon para crear trigo panificable resistente a una antigua plaga, el oídio.

CRISPR representa la forma menos perjudicial de mejoramiento vegetal que los humanos hemos ideado jamás, según los que aplican esta técnica

Sin embargo, la revolución de la edición genética había comenzado antes de la llegada de CRISPR. Para personas como Voytas, CRISPR no es más que el último capítulo de una saga científica mucho más larga que está ahora dando sus frutos. Hace 15 años, cuando se hallaba en la Universidad estatal de Iowa, ya intentó por primera vez editar genes de plantas con una técnica conocida como dedos de zinc; su primera empresa de edición genética se hundió por cuestiones de patentes. En 2008 se trasladó a la Universidad de Minnesota y en 2010 patentó, con su excolaborador de la Universidad estatal de Iowa Adam Bogdanove, ahora en la Universidad Cornell, un sistema de edición genética en las plantas basado en TALEN (de las siglas en inglés «nucleasas efectoras similares a los activadores de la transcripción»). Ese mismo año, Voytas y sus colaboradores fundaron una empresa llamada ahora Calyxt. Sin el alboroto de CRISPR, los agrónomos han utilizado TALEN para obtener plantas con genes editados que ya se cultivan en los campos de América del Norte y del Sur. Calyxt, por ejemplo, ha creado dos cepas de soja modificadas para producir un aceite saludable, con niveles de ácidos grasos monoinsaturados equiparables a los de los aceites de oliva y colza. Y la empresa cuenta con una cepa de patata que no acumula ciertos azúcares durante su almacenamiento en frío, lo que reduce el sabor amargo producido por el almacenamiento, así como la cantidad de acrilamida, un carcinógeno que se origina cuando se fríen las patatas.

Debido a que estas modificaciones genéticas no implican la introducción de ningún gen extraño, el Servicio de Inspección Animal y Vegetal (APHIS) del USDA decidió el año pasado que

CULTIVOS VEGETALES

Distintas formas de manipular los genes

Los humanos hemos cultivado plantas desde hace miles de años, y durante todo el tiempo hemos intentado identificar e incorporar rasgos beneficiosos (rendimientos más altos, resistencia a enfermedades) en variedades de plantas ya existentes. Primero se usó el cruzamiento clásico. A principios del siglo xx los científicos aprendieron a inducir mutaciones en el ADN de plantas con la esperanza de que aparecieran al azar rasgos deseables. Hoy, las nuevas técnicas de «mejora de precisión», como CRISPR, permiten modificar genes específicos o insertar nuevos rasgos genéticos con una precisión sin precedentes. Sin embargo, todas estas técnicas alteran el ADN de las plantas, lo que hace preguntarse qué se entiende por un organismo modificado genéticamente (OMG).

Conceptos clave

Mutagénesis: Desde los años veinte los agrónomos han mutado deliberadamente el ADN de semillas de plantas con rayos X, rayos gamma o productos químicos, y luego han cultivado las plantas para ver si han adquirido rasgos beneficiosos. Si es así, las plantas mutadas pueden cruzarse con variedades existentes. Las variedades así obtenidas no son consideradas transgénicas por el Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA)

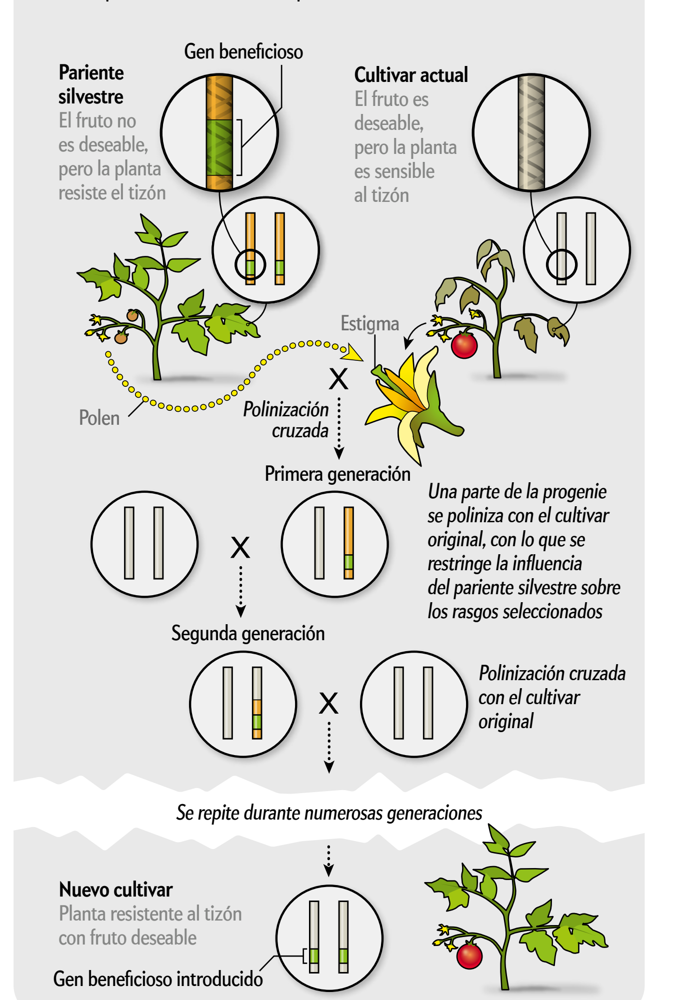
Silenciado de genes: Durante la última década, los científicos han logrado desactivar genes que confieren rasgos no deseados mediante la introducción de una forma perjudicial de ARN en las células vegetales. Este ARN de interferencia (o ARNi) está diseñado para alterar una secuencia específica de ADN responsable de un rasgo indeseable. Con este método se han creado varios cultivos alimentarios, como patatas y manzanas que no pardean. El USDA no los considera OMG.

Cisgénesis: Este proceso implica la introducción de un gen específico de una especie de planta emparentada. La transferencia suele realizarse mediante un microorganismo, *Agrobacterium tumefaciens*, que infecta la planta e inserta el gen en un lugar aleatorio de su ADN. El USDA revisa las plantas cisgénicas caso por caso para determinar su situación reglamentaria.

Transgénesis: La técnica implica la transferencia de ADN foráneo que codifica un rasgo deseado en una especie de planta no emparentada. Como en la cisgénesis, se utiliza la bacteria *A. tumefaciens*, que introduce el ADN extraño cuando infecta la célula vegetal. Un ejemplo de cultivo transgénico es el maíz en el que se ha insertado un gen resistente a los herbicidas. El noventa por ciento de toda la soja cultivada en EE.UU. es transgénica; el USDA considera que las plantas transgénicas son OMG.

Mejora vegetal tradicional

Consiste en la selección y fecundación cruzada después de la mutagénesis. Durante la reproducción natural, grandes segmentos de cromosomas (hasta millones de pares de bases) se introducen junto con el rasgo deseado en un cultivar domesticado. Los cruces posteriores suelen reducir la cantidad de ADN transferido, pero el inserto permanece a menudo a lo largo de cientos de miles de pares de bases y puede arrastrar consigo genes indeseables (arrastre por vinculación) en el proceso. Un análisis genómico en 2010 de *Arabidopsis* (la planta modelo por excelencia) mostró que la mejora clásica introdujo en cada generación unas siete nuevas mutaciones espontáneas por cada mil millones de pares de bases de ADN.

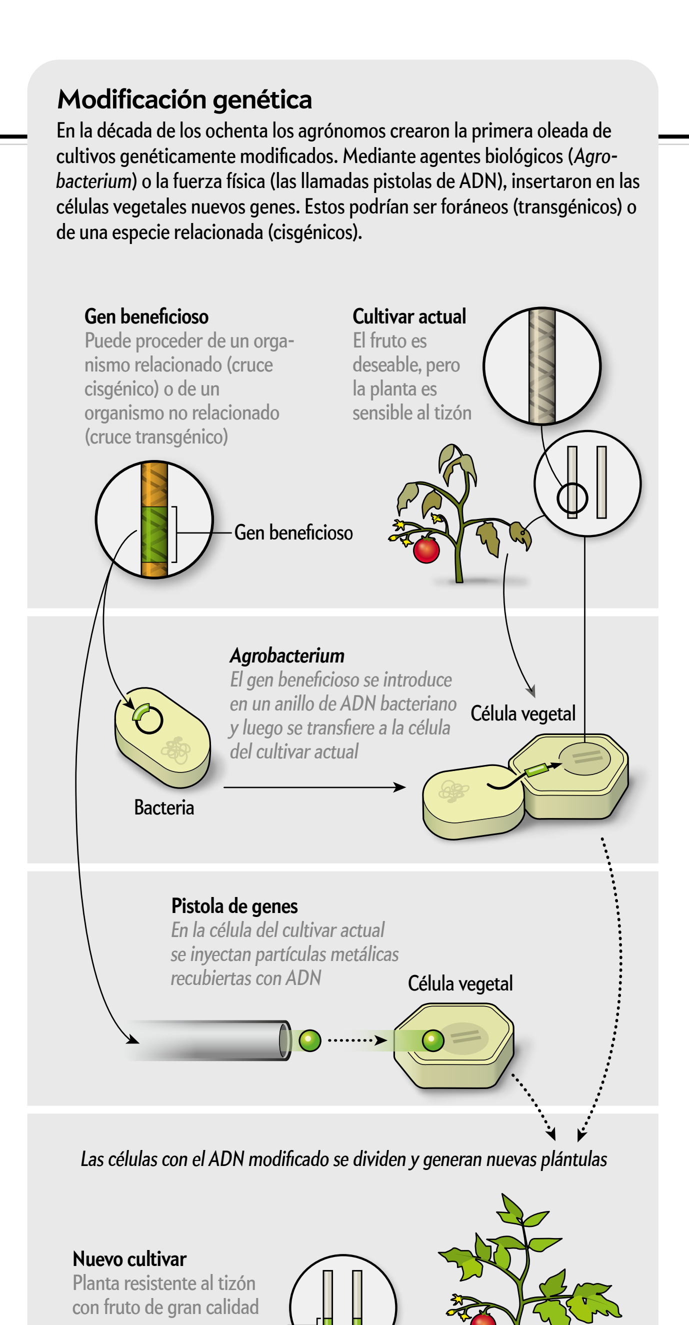


JEN CHRISTIANSEN

los cultivos no requerían ser regulados como transgénicos. «El USDA ha dado el visto bueno a la plantación de una variedad de patata y dos variedades de soja, por lo que la patata y una de las variedades de soja se hallan en el campo este año», me comentó Voytas en octubre del año pasado. «Básicamente, consideraron estas plantas como si fueran normales, como si se hubieran generado mediante mutágenos químicos, rayos gamma o cualquier técnica no regulada. El hecho de que obtuviéramos la autorización y de que podamos pasar casi de inmediato del invernadero al campo es una gran ventaja. Nos permite acelerar de verdad el desarrollo de productos.»

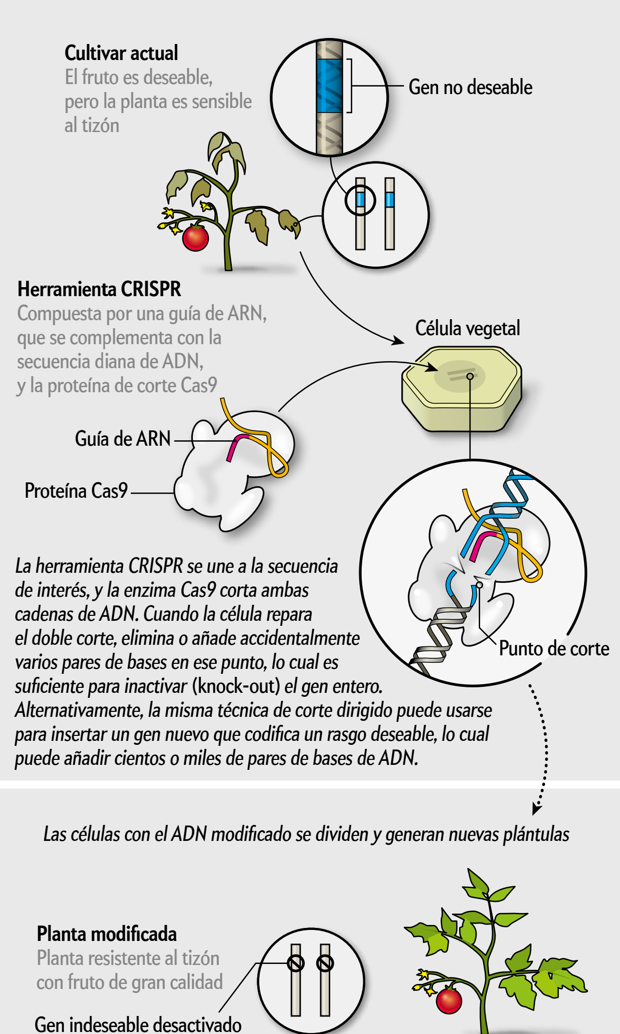
En el ámbito pecuario, también se ha dado un salto en la edición genética. Los investigadores de Recombinetics, una pequeña empresa de biotecnología de Minnesota, han bloqueado genéticamente la señal biológica que regula el crecimiento de los cuernos en vacas Holstein, la raza más importante de la industria láctea. Los científicos consideran esta aplicación de la edición genética una forma más humana de ganadería, ya que evita que los machos y hembras Holstein tengan que someterse a un procedimiento espantoso en el que los ganaderos arrancan y luego cauterizan los cuernos en desarrollo (ello se lleva a cabo para proteger de lesiones tanto a los animales como a los ganaderos). Scott Fahrenkrug, gerente de la empresa, afirma que el proceso no involucra transgenes, solo la introducción de unas pocas letras del ADN para «obtener la carne que ya comemos». Científicos coreanos y chinos, por su parte, se han unido para crear un cerdo con mucha más masa muscular al inactivar un gen llamado miostatina.

La velocidad, la facilidad y el bajo coste hacen de CRISPR una técnica aún más atractiva que TALEN. «Sin lugar a dudas», Voytas apunta, «en un futuro CRISPR va a ser la herramienta de elección para edición genética vegetal». Sin embargo, la tur-



Edición genética

Con las técnicas de edición genética de precisión (dedos de zinc, TALEN y CRISPR), los biólogos pueden modificar un gen específico, bien desactivándolo, o bien sustituyéndolo por otro. El gen de sustitución puede proceder de especies no relacionadas (transgénesis) o de una variedad relacionada (cisgénesis). Aunque CRISPR puede ser dirigido a un lugar específico, la enzima acompañante Cas9 a veces realiza cortes no programados, fuera del punto de interés; algunos datos indican que los cortes erróneos resultan infrecuentes en las plantas.



bia situación de la patente, en la que tanto la Universidad de California como el Instituto Broad (gestionado conjuntamente por el Instituto de Tecnología de Massachusetts y la Universidad Harvard) reclaman haber inventado CRISPR, puede retrasar su desarrollo comercial en la agricultura. DuPont ha alcanzado recientemente una «alianza estratégica» con Caribou Biosciences, empresa de biotecnología asociada a la Universidad de California en Berkeley, para utilizar las aplicaciones de CRISPR en la agricultura, pero los ejecutivos de dos pequeñas empresas de biotecnología declararon a esta revista que temían desarrollar productos mediante CRISPR mientras no se resolviera la disputa sobre su patente.

En cambio, ello no supone un obstáculo para los laboratorios académicos. La aplicación de CRISPR en las setas dio un giro decisivo en octubre de 2013, cuando un alumno de la Universidad de estatal de Pensilvania llamado David Carroll apareció en el laboratorio de Yang. Carroll, presidente de Giorgi Mushroom, preguntó si las nuevas técnicas de edición genética podrían perfeccionarse para mejorar las setas. Alentado por la capacidad de CRISPR de crear mutaciones de alta precisión, Yang respondió: «¿Qué tipo de rasgo quieres?» Carroll sugirió el antioscurecimiento, y Yang convino de inmediato en estudiarlo.

Yang conocía exactamente el gen que debía tratar. Los biólogos habían identificado previamente una familia de seis genes, cada uno de los cuales codifica una enzima que causa el pardeamiento (la misma clase de genes que provoca este efecto en las manzanas y las patatas, ambas también sometidas a la edición genética). Cuatro de los genes responsables del oscurecimiento generan esa enzima en el cuerpo fructífero de los hongos, y Yang pensó que si lograba desactivar uno de ellos, podría retrasar el pardeamiento.

¿Cómo regulará Europa las técnicas de edición genética en la agricultura?

Un sistema legislativo rígido y que no tiene en cuenta los argumentos científicos dificulta la toma de decisiones sobre CRISPR y otros métodos de última generación

PERE PUIGDOMÈNECH

En 1983 se publicaron los primeros estudios demostrativos de la modificación genética en las plantas. Estas presentaban nuevos caracteres gracias a que incorporaban fragmentos de genes que habían sido aislados en el laboratorio. De forma casi inmediata, los principales países desarrollados del mundo, entre ellos los Estados Unidos y la Unión Europea, diseñaron procedimientos para regular el uso en el campo de las plantas que pudieran producirse mediante esas nuevas técnicas. Estados Unidos aprobó el llamado Marco Coordinado para la Reglamentación de la Biotecnología en 1984, y Europa la primera Directiva en 1990, cuatro años antes de que se llevara al campo el primer cultivo de plantas con una modificación genética. Pero nos hallamos en 2016 y Europa cuenta con un sistema regulador cada vez más rígido, a pesar de que los avances científicos van abriendo un amplio abanico de nuevas posibilidades. La consecuencia de ello es una situación paralizada que dificulta la toma de decisiones.

En Europa los mecanismos de aprobación de nuevas variedades de plantas obtenidas mediante ingeniería genética han estado en marcha desde hace tiempo, en particular desde que en el 2001 se aprobó la Directiva 2001/18 sobre la liberación deliberada en el ambiente de organismos modificados genéticamente (OMG) y, en el 2003, el Reglamento 1829/2003 sobre los alimentos basados en materiales procedentes de ellos. El análisis científico del riesgo de los OMG sobre la salud humana y animal y el entorno lo realiza el panel de expertos sobre OMG de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), el cual ha ido emitiendo sus opiniones durante este tiempo. Sin embargo, la aprobación por parte de la administración europea ha estado paralizada debido a la imposibilidad de los Estados miembros en alcanzar acuerdos.

En los últimos años se han sucedido dos nuevos cambios en la normativa. Uno ha sido la aprobación de la Directiva 2015/412, que autoriza a los Estados miembros a restringir el uso de cultivos modificados genéticamente en su territorio por razones que no sean de naturaleza científica. El segundo corresponde al reglamento de ejecución de la Comisión Europea 503/2013, que dicta un procedimiento detallado de los requisitos que deben cumplirse para la aprobación de las plantas modificadas genéticamente. Se trata de cambios sustanciales respecto al proceso de autorización de estas plantas, ya que se fragmenta la decisión sobre su cultivo y se contradice el proceso de análisis caso por caso que ha estado siempre vigente en las directivas sobre el tema.

Mientras tanto, la ciencia sigue su camino. Los datos sobre genomas de plantas van en aumento y proporcionan una rica información que puede aprovecharse para la mejora de las especies cultivadas. Al mismo tiempo, aparecen metodologías y conceptos nuevos que plantean la necesidad de definir su encaje en el marco regulador existente.

La agilidad del método CRISPR deriva de la posibilidad de personalizar la herramienta para producir tales mutaciones. Como un cuchillo multiusos que combinara brújula, tijeras y sistema de sujeción, CRISPR resulta extraordinario en dos tareas: se fija en un tramo muy concreto del ADN y luego lo corta. La fijación se lleva a cabo con la ayuda de un pequeño fragmento de ácido nucleico denominado guía de ARN. Esta se complementa con la secuencia de ADN de la región de interés y se une a ella gracias a la atracción que se produce entre los pares de bases, según dieron a conocer James Watson y Francis Crick (en la que A se une a T y C a G). Si se crea una guía de ARN de 20 letras de longitud, esta hallará con la precisión de un GPS su secuencia complementaria de ADN en medio de la cadena de 30 millones de letras que componen el genoma del hongo *Agaricus*. El corte lo realiza entonces la enzima Cas9 (originariamente aislada de cultivos de bacterias en el yogur), la cual se halla en la parte posterior de la guía de ARN. (El término CRISPR/Cas9 es un nombre poco apropiado ahora, porque la sigla inglesa CRISPR significa «repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente espaciadas», que son regiones de ADN que solo presentan las bacterias. Es la proteína Cas9, con la ayuda de la guía de ARN, la que edita el ADN de plantas, hongos y humanos, a pesar de que no hay CRISPR involucradas.)

Una vez que se ha cortado el ADN en el punto deseado, se deja que la naturaleza realice el trabajo sucio de la mutación. En el momento en que la doble hélice de ADN se corta, la célula se da cuenta de la herida y se dispone a repararla. Sin embargo, estas reparaciones no son perfectas, lo que hace precisamente de CRISPR una herramienta tan potente en la creación de mutaciones. Durante el proceso de reparación suelen perderse unas pocas letras del ADN; como la maquinaria celular de síntesis de proteínas lee el ADN en «palabras» de tres letras, la eliminación de un par de letras altera todo el texto y, en última instancia, inactiva el gen mediante lo que se conoce como un desplazamiento del marco de lectura. Eso sucedió exactamente en el champiñón modificado genéticamente. En el trabajo de Yang, una pequeña deleción de ADN inactivó una de las enzimas que promueven el oscurecimiento, una mutación que Yang y sus colaboradores confirmaron con el análisis del ADN. Según Yang, un biólogo molecular experimentado podría tardar tres días en crear una herramienta de mutaciones personalizada para editar prácticamente cualquier gen de casi cualquier organismo.

Esa opinión acerca de CRISPR es compartida por la mayoría de los científicos: la técnica es rápida, barata y fácil. Bastaron unos dos meses de trabajo de laboratorio para crear el hongo que no pardea; la actitud de Yang sugiere que el trabajo fue rutinario, si no ridículamente fácil. Y también barato. El paso más difícil, preparar la guía de ARN y su sistema de sujeción, cuesta un par de cientos de dólares; hay una serie de pequeñas



Distintas instancias comunitarias y científicas han realizado este análisis y han puesto de manifiesto la necesidad de avanzar en la legislación para adaptarse a los cambios. En concreto, el panel de expertos sobre OMG de la EFSA publicó en 2013 las opiniones, basadas en el trabajo de un grupo de científicos, sobre dos innovaciones. Una de ellas corresponde a las denominadas técnicas de cisgénesis e intragénesis. Se trata de un tipo de modificación genética de plantas en la que se utilizan genes de la misma especie o de otra muy cercana y que puede aplicarse en casos en los que la mejora con métodos clásicos resulta difícil. La otra innovación corresponde a las técnicas basadas en sistemas que permiten modificar el genoma o insertar un transgén (gen de otra especie) en lugares precisos mediante lo que se conoce como nucleasas dirigidas. Este informe se realizó incluso antes del desarrollo de las actuales técnicas de edición genómica basadas en el sistema CRISPR/Cas9. En los dos casos se proponía que los requisitos para la aprobación fueran menos estrictos. Al parecer, estas propuestas no debieron ser bien recibidas en la Comisión Europea, ya que el panel de expertos sobre OMG fue disuelto antes de que pudiera exponer otras cuestiones.

En esta situación, las técnicas de edición genómica plantean un dilema a las instituciones europeas. Por una parte, si la modificación genética se define en función del método que se emplea, pueden hallarse argumentos para decidir que las nuevas técnicas no son más que otro tipo de modificación genética. Ello implica que deberá someterse al actual proceso regulador, con sus rigideces y sus costos enormes. Por otra parte, algunos de estos métodos no dejan huellas en el ADN y pueden ser muy difíciles de distinguir de mutaciones espontáneas, por lo que parece poco lógico tratar las plantas y alimentos así obtenidos del mismo modo que el resto de OMG.

Los Estados miembros están divididos sobre el tema y diversas organizaciones científicas ya han alertado de los riesgos que supone para la investigación utilizar normas tan rígidas. Países como Estados Unidos y Argentina, que generan ciencia y productos vegetales, ya han comenzado a decidir que no van a regular estas modificaciones como si fueran OMG. En estas condiciones, estaba previsto que la Comisión Europea emitiera un análisis jurídico sobre la cuestión a mediados de 2015, pero su publicación va retrasándose y el último anuncio se ha hecho para fines del 2016. Un ejemplo más de la dificultad de tomar decisiones en este tema tan debatido sin tener en cuenta los argumentos científicos.

Pere Puigdomènech *es profesor de investigación del CSIC y trabaja en el Centro de Investigación en Agrigenómica de Bellaterra, centro mixto del CSIC y varias instituciones públicas catalanas. Ha sido miembro del Grupo Europeo de Ética de las Ciencias y las Nuevas Tecnologías de la Unión Europea.*

empresas biotecnológicas que hoy ofrecen diseñar CRISPR a la medida para editar cualquier gen deseado. El mayor coste es la mano de obra: Xiangling Shen, estudiante posdoctoral en el laboratorio de Yang, trabajó en el proyecto a tiempo parcial. «Si no se cuenta la mano de obra, es probable que cueste menos de 10.000 dólares», comenta Yang. En el mundo de la biotecnología agrícola, eso es calderilla.

Y apenas se empieza a insinuar el potencial ahorro de CRISPR en el ámbito de la reglamentación. En octubre del año pasado, Yang presentó de manera informal su trabajo sobre los hongos a los reguladores federales del APHIS, organismo que decide si un cultivo alimentario modificado genéticamente debe ser regulado por el Gobierno (en pocas palabras, si debe considerarse un transgénico); salió de la reunión convencido de que las autoridades no creían que el hongo CRISPR necesitara una revisión especial o extendida de la regulación. De ser así, ello contribuiría en su mayor parte al abaratamiento de la técnica: Voytas calcula que el proceso de revisión puede costar hasta 35 millones de dólares y durar hasta cinco años y medio.

Otra ventaja del champiñón para el estudio preliminar de la aplicación de CRISPR en la agricultura es la velocidad a la que crecen los hongos: desde las esporas hasta la madurez, las setas se forman en unas cinco semanas, y se pueden cultivar durante todo el año en instalaciones de clima controlado sin ventanas. La soja y las patatas creadas por Calyxt, por el contrario, exigen meses de ensayos de campo, por lo que la empresa solicitó y recibió la autorización para cultivar su soja en Argentina entre finales de 2014 y principios de 2015. «Al situarnos alrededor del ecuador», comenta Voytas, «podemos obtener varias cosechas en un año». En EE.UU., Calyxt cosechó sus primeros cultivos editados genéticamente en octubre del año pasado.

Uno de los antiguos temores acerca de la modificación genética es el fantasma de las consecuencias no deseadas. En el mundo de la biotecnología alimentaria ello suele significar la formación de toxinas o alérgenos inesperados que vuelven nocivos los alimentos modificados (un riesgo que nunca se ha demostrado para un alimento transgénico), o cultivos fuera de control que causan estragos en la ecología local. La técnica CRISPR está haciendo que incluso personas como John Pecchia piensen en las consecuencias económicas no deseadas. Es uno de los dos profesores de la Universidad estatal de Pensilvania que pasa largo tiempo en un edificio de las afueras del campus, donde se ubica el único centro de EE.UU. para la investigación académica de producción de setas. En primavera de 2015, Pecchia tomó un poco de cultivo iniciador de Yang e hizo crecer el primer lote de champiñones editados genéticamente. De pie frente a una habitación donde se prepara una humeante y fétida mezcla de compost de champiñón a 80 grados centígrados, señala que un hongo con una vida útil más larga podría dar lugar a una menor demanda de las tiendas y también dar pie a una competencia

inesperada. «Se podrían abrir las fronteras a importaciones extranjeras de hongos», añade, «por lo que representa un arma de doble filo».

En el tortuoso camino de los alimentos modificados genéticamente hacia los mercados, debe superarse una paradoja más. Nadie sabe a qué saben las setas con genes editados. Han sido hervidas y cocidas al vapor, pero no para ser ingeridas. Cada seta creada hasta ahora ha sido destruida después de que Yang llevara a cabo sus pruebas para evitar el oscurecimiento. Tras finalizar el estudio demostrativo preliminar, explica Pecchia, simplemente se desecharon las setas.

MODIFICACIÓN SIN TRANSGENES

¿Rechazará también la población los alimentos editados genéticamente o les dará la bienvenida en sus cocinas y en sus platos? Esa puede ser la cuestión central en el capítulo más intrigante de la historia de los alimentos CRISPR, que coincide con un momento crítico en el tumultuoso debate que existe desde hace treinta años sobre los cultivos modificados genéticamente.

Algunas técnicas novedosas, como CRISPR, están obligando a los Gobiernos a reconsiderar la definición de organismo modificado genéticamente

Cuando Yang describió su proyecto sobre los hongos a los agricultores de Pensilvania y a los funcionarios del USDA en octubre de 2015, utilizó un término revelador para describir su procedimiento: «modificación genética sin transgenes». Se trata de un intento cuidadosamente pensado para distinguir las nuevas técnicas de edición genética de alta precisión, como CRISPR, de las primeras técnicas de la biotecnología agrícola, en las que se añadía ADN extraño (transgenes) a una especie vegetal. Para Yang y otros, esta delicada terminología resulta importante para replantear el debate de los transgénicos.

La reformulación es tanto filosófica como semántica, y se desarrolla conforme la administración Obama perfecciona el sistema por el que el Gobierno revisa los cultivos y alimentos modificados genéticamente. Conocido como Marco Coordinado para la Reglamentación de la Biotecnología, este proceso regulador, que no ha sido actualizado desde 1992, determina las funciones del USDA, de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos y de la Agencia de Protección Ambiental. El gran potencial de CRISPR ha añadido urgencia al replanteamiento normativo, y los científicos aprovechan la oportunidad para retomar una pregunta muy antigua: ¿Qué significa en realidad «modificado genéticamente»? Voytas, cuyo historial de publicaciones y patentes sobre cultivos editados genéticamente lo convierte en una suerte de asesor de las pequeñas empresas de agricultura biotecnológica en los EE.UU., responde con una risa sombría a esa pregunta: «El término OMG es un asunto peliagudo.»

¿Por qué es tan compleja la cuestión? La mayoría de los críticos de los alimentos biotecnológicos argumentan que cualquier forma de modificación genética conlleva posibles mutaciones o alteraciones no deseadas que podrían plantear riesgos para la salud humana o el ambiente. Científicos como Voytas y Yang responden que todos los sistemas de mejora vegetal, que se remontan hasta la creación del trigo panificable en el Neolítico, hace 3000 años, implican una modificación genética, y que las técnicas tradicionales de mejora no son biológicamente inocuas. Su aplicación, opina Yang, crea una «enorme» perturbación genética. (Nina Fedoroff, bióloga vegetal y expresidenta de la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia, se ha referido a las versiones domesticadas de trigo panificable, creadas por mejora tradicional, como «monstruosidades genéticas».)

Antes de la era del ADN recombinante, en la década de los setenta, que dio lugar a la primera generación de cultivos biotecnológicos, los fitomejoradores solían recurrir a métodos de fuerza bruta (rayos X, rayos gamma o productos químicos agresivos) para alterar el ADN de las plantas. A pesar de esa estrategia grosera, algunas de las mutaciones aleatorias creadas con ella originaron rasgos agrícolas deseables: mayor rendimiento, fruta mejor formada o capacidad de crecer en condiciones adversas, como la sequía. Estas mutaciones beneficiosas podían entonces combinarse con rasgos beneficiosos presentes en otras cepas, pero solo mediante el cruzamiento de las plantas. Tales cruzamientos conllevan mucho tiempo, a menudo entre cinco y diez años, pero al menos es un proceso «natural».

Pero también provoca fuertes cambios. En cualquier momento en que el ADN de dos individuos, ya sean humanos o plantas, se junta durante la reproducción, el material genético de ambos se entremezcla en un proceso conocido como recombinación cromosómica. En cada generación pueden aparecer mutaciones espontáneas, y cuando los mejoradores seleccionan un rasgo deseado pueden transferirse millones de pares de bases de ADN. Es natural, sí, pero también se forma «un gran revoltijo», según Voytas. «En el proceso no solo se desplaza un único gen», comenta. «Con frecuencia se mueve un fragmento de ADN bastante grande de la especie silvestre.» Además, durante el cruzamiento, el rasgo deseable arrastra a menudo con él un rasgo indeseable que se halla en la misma región de ADN, un efecto que puede dañar la planta obtenida de forma «natural». Basándose en varios descubrimientos recientes sobre las características genéticas del arroz, algunos biólogos plantean la hipótesis de que la domesticación ha introducido de forma inadvertida mutaciones perjudiciales «silenciosas» en la planta, además de los rasgos beneficiosos evidentes.

A pesar de que es más precisa que la mejora tradicional, la técnica CRISPR no resulta infalible. A veces corta una región del ADN que no es la de interés, y la frecuencia de estos cortes erróneos ha planteado problemas de seguridad (que también es la razón principal por la que la edición genética de espermatozoides y óvulos humanos todavía se considera insegura y poco ética). Jennifer Kuzma, analista de políticas de la Universidad estatal de Carolina del Norte que ha seguido la evolución de la agricultura transgénica desde su creación, comenta que la precisión tiene mérito, pero no necesariamente guarda relación con una reducción del riesgo; y añade que los cortes fuera de lugar pueden introducir una nueva forma de amenaza. Feng

SI TE INTERESA
ESTE TEMA...

Descubre nuestro monográfico digital *Cultivos transgénicos*, que indaga en las ventajas y desventajas de estos cultivos para la producción de alimentos y aborda el intenso debate que genera la aplicación de la ingeniería genética a los productos agrícolas.



www.investigacionyciencia.es/revistas/especial

Zhang, del Instituto Broad (que ostenta la patente ahora en disputa) ha publicado varios perfeccionamientos del sistema de CRISPR que aumentan su especificidad y reducen los cortes erróneos.

La facilidad y el bajo coste de CRISPR también han permitido a laboratorios académicos y pequeñas empresas biotecnológicas entrar en un negocio que históricamente ha sido monopolizado por las grandes sociedades agrícolas. Al principio, solo las compañías con mucho dinero podían sufragar el costoso proceso de regulación, y hasta la fecha, casi todos los cultivos modificados mediante ingeniería genética se han creado para mejorar la economía de los agricultores o las empresas, gracias ya sea al elevado rendimiento de los cultivos de Monsanto resistentes a los herbicidas, o ya sea a la resistencia al envío y manipulación del tomate Flavr-Savr de Calgene. Esas modificaciones genéticas resultaban más atractivas para la agroindustria que para los consumidores, y no se centraban en la calidad de los alimentos. Según ha señalado un grupo de expertos en políticas agrícolas de la Universidad de California, «las corporaciones multinacionales que han dominado este campo durante la última década y media no tienen un historial brillante en términos de innovación más allá de seleccionar rasgos de resistencia a plaguicidas y herbicidas».

Los nuevos actores han traído un tipo diferente de innovación a la agricultura. Voytas sostiene que la precisión de la edición genética permite a los biotecnólogos dirigirse a los consumidores mediante la creación de alimentos más seguros y saludables. Voytas y su colega Caixia Gao, de la Academia China de Ciencias, han señalado que las plantas tienen muchos productos «antinutricionales». Se trata de sustancias nocivas o toxinas, algunas para la autodefensa, que podrían ser eliminadas mediante la edición genética para mejorar los rasgos nutricionales y de sabor. La patata de Calyxt, por ejemplo, presenta un menor sabor amargo asociado al almacenamiento en frío de los tubérculos.

Pero Voytas va más allá. Cree que la soja de Calyxt podría venderse a los agricultores como un producto no transgénico porque, a diferencia del 90 por ciento de la soja cultivada en EE.UU., las cepas editadas genéticamente carecen de genes foráneos. «Mucha gente no quiere productos transgénicos», apunta. «Con nuestro producto se podría obtener aceite o harina de soja no modificada genéticamente.»

Como toda nueva técnica de gran alcance, CRISPR hace pensar a algunos soñadores agrícolas en un futuro casi de ciencia ficción. Michael Palmgren, biólogo vegetal de la Universidad de Copenhague, ha propuesto que se utilicen los nuevos métodos de edición genética para «reasilvestrar» plantas alimentarias, es decir, para recuperar los rasgos que se han perdido durante generaciones de selección agrícola. Varios cultivos de alimentos económicamente importantes, en particular, el arroz, el trigo, la naranja y el plátano, son muy vulnerables a los patógenos vegetales; la restauración de los genes perdidos podría aumentar su resistencia a las enfermedades. Palmgren y sus colaboradores daneses han señalado que la estrategia aspira a «revertir los resultados no deseados de la selección».

Los intentos de reasilvestrar ya están en marcha, pero con un toque distinto. Voytas explica que su laboratorio de la Universidad de Minnesota, en lugar de reintroducir los rasgos perdidos en las razas domésticas, está intentando lo que él llama «domesticación molecular»: la transferencia de genes agrícolas deseables de los híbridos existentes a las especies silvestres que sean más resistentes y más adaptables, como las formas ancestrales del maíz y las patatas. «Por lo general, fueron solo un puñado de cambios críticos (que afectaron a cinco, seis o siete genes), como el tamaño del fruto o el número de mazorcas de maíz, los que convirtieron una especie rústica en otra deseable», explica Voytas. En lugar de cruzar las variedades silvestres con las líneas domesticadas, lo que significaría diez años de fitomejoramiento, tal vez podamos simplemente dirigirnos a esos genes y domesticar la variedad silvestre.

Hay indicios de que la edición genética, incluida la técnica CRISPR, puede gozar también de un proceso regulador más rápido. Hasta ahora, los organismos legisladores estadounidenses parecen considerar que al menos algunos cultivos editados genéticamente son diferentes de los transgénicos. Cuando Calyxt preguntó por primera vez al USDA si sus patatas necesitaban una revisión de la normativa, los funcionarios federales tardaron alrededor de un año antes de decidir, en agosto de 2014, que la edición genética no precisaba una consideración especial; cuando la empresa volvió al USDA el verano del año pasado con la nueva soja, los colaboradores del Gobierno solo tardaron dos meses en llegar a una conclusión similar. Para las empresas, ello indica que las autoridades estadounidenses consideran las nuevas técnicas fundamentalmente distintas de los métodos transgénicos; los críticos, en cambio, piensan que hay un vacío legal del que las empresas se están aprovechando. Las setas de Yang pueden ser el primer alimento CRISPR examinado por el USDA. (El pasado abril, este organismo dio luz verde a su cultivo al considerar que no requerían someterse a un proceso regulador.)

Las técnicas nuevas como CRISPR están obligando a algunos Gobiernos a reconsiderar la definición de transgénico. En noviembre del año pasado, el Consejo de Agricultura sueco decretó que algunas mutaciones de plantas inducidas por CRISPR no se ajustan a la definición de transgénico de la Unión Europea, y Argentina ha llegado de manera similar a la conclusión de que ciertas plantas con genes editados quedan fuera de su reglamento de transgénicos. La Unión Europea, que históricamente ha restringido el cultivo de plantas modificadas genéticamente, está revisando su política a la luz de las nuevas estrategias de edición genética, pero su análisis jurídico, varias veces retrasado, no se hará público hasta finales de año, como muy pronto. Si bien una posición intermedia es poco factible, Voytas y otros han propuesto una solución de compromiso: la edición genética que causa una mutación o inactivación (*knock out*) de un gen debe considerarse análoga a las formas tradicionales de mejora vegetal (donde los rayos

X, por ejemplo, se utilizan para crear mutaciones), mientras que la edición genética en la que se introduce ADN nuevo (*knock in*) merece un escrutinio reglamentario basado en un análisis de caso por caso.

La hora de la verdad para la comercialización de los alimentos obtenidos de cultivos editados genéticamente tal vez no se halle demasiado lejos; Voytas cree que Calyxt realizará un «pequeño lanzamiento comercial» de su soja en 2017 o 2018. «Llevará algún tiempo obtener semilla suficiente para sembrar, por ejemplo, doscientas cincuenta mil hectáreas», comenta. «Pero estamos trabajando tan intensa y rápidamente como podemos.»

¿Cómo responderá la población? Kuzma predice que las personas que se han opuesto históricamente a la modificación genética no van a beber a corto plazo un refresco producido con CRISPR. «No es probable que el público que se oponía a la primera generación de transgénicos acepte esta segunda generación de ingeniería genética solo porque estamos ajustando un poco el ADN», apunta. «Simplemente van a meterla en el mismo saco que los transgénicos.» Kuzma está más preocupada por la necesidad de reformar la estructura reglamentaria general y escuchar más voces en el proceso de revisión en el «punto de inflexión» en el que nos hallamos, en el que cada vez más alimentos editados genéticamente están abriéndose camino para llegar al mercado.

Pero ¿qué ha sucedido con los champiñones de Yang? Más allá de los aplausos educados al final de su charla, la reacción de los productores de setas no está clara todavía. Yang lo reconoció cuando explicó a los agricultores: «Depende de ustedes que el producto pueda comercializarse». Por ahora, el champiñón que no pardea es solo un proyecto de laboratorio, una prueba demostrativa preliminar. Si los productores no están convencidos de su valor o los consumidores lo rechazan, podría no ver la luz del día. Sería algo bueno para una seta, que crece en la oscuridad, pero quizá resulte inquietante para una técnica nueva y potencialmente transformadora. IyC

PARA SABER MÁS

Precision genome engineering and agriculture: Opportunities and regulatory challenges. Daniel F. Voytas y Caixia Gao en *PLOS Biology*, vol. 12, n.° 6, art. e1001877, junio de 2014.

Conflicting futures: Environmental regulation of plant targeted genetic modification. Adam Kokotovich y Jennifer Kuzma en *Bulletin of Science, Technology & Society*, vol. 34, n.os 3-4, págs. 108-120, junio-agosto de 2014.

Feasibility of new breeding techniques for organic farming. Martin Marchman Andersen et al. en *Trends in Plant Science*, vol. 20, n.° 7, págs. 426-434, julio de 2015.

A Face-lift for biotech rules begins. Emily Waltz en *Nature Biotechnology*, vol. 33, n.° 12, págs. 1221-1222, diciembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La edición genética, más precisa. Margaret Knox en *IyC*, febrero de 2015.

Riesgos de la edición genética. Jeantine Lunshof en *IyC*, agosto de 2015.

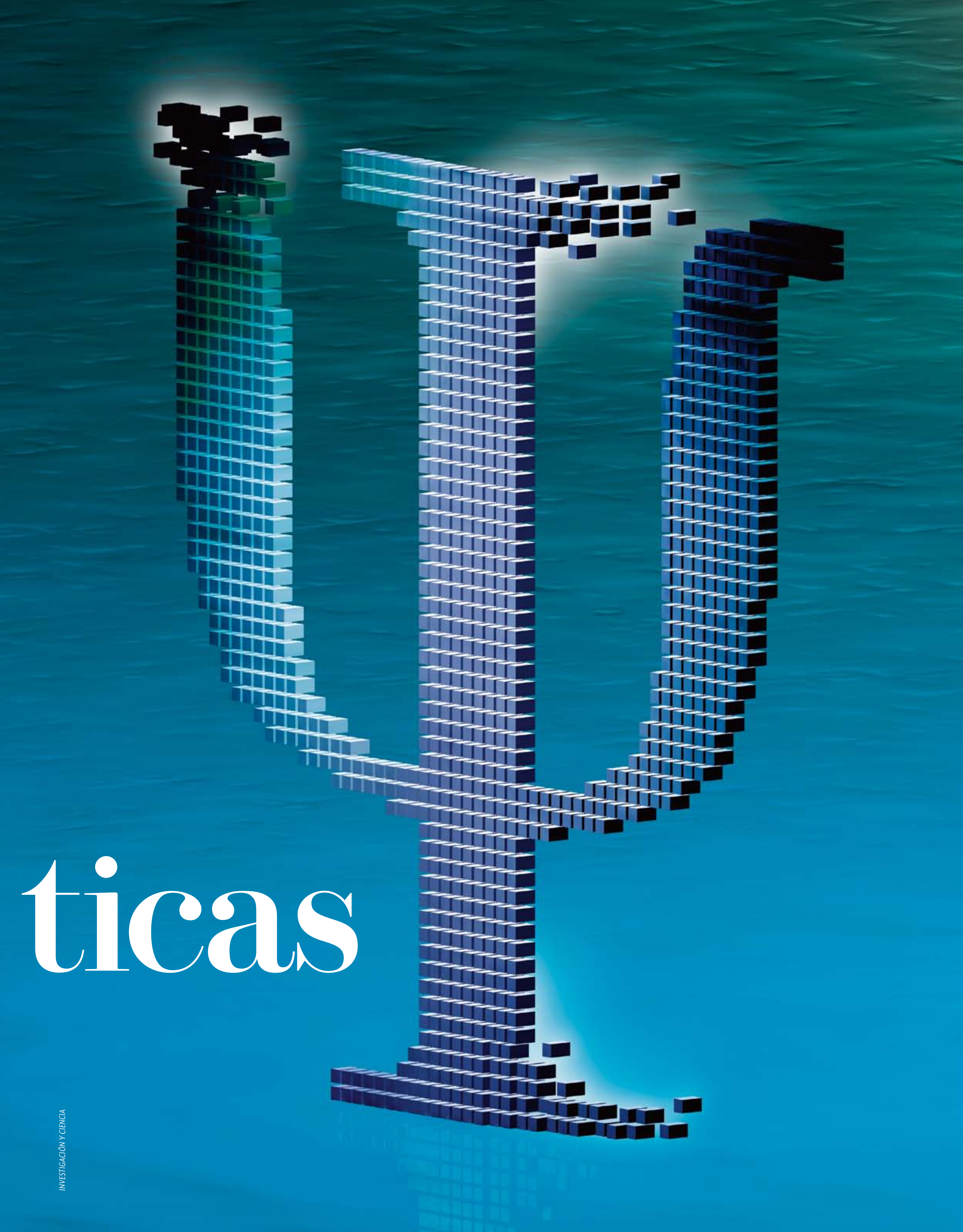
Cultivos transgénicos: sigue el debate. David H. Freedman en *IyC*, agosto de 2015.

FÍSICA

Teorías supracuán

¿Es la física cuántica una teoría fundamental?

Miguel Navascués



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Miguel Navascués es experto en información cuántica en el Instituto de Óptica Cuántica e Información Cuántica de Viena, donde lidera uno de los grupos de investigación.



DESDE QUE TRABAJO EN FÍSICA FUNDACIONAL, ALGUNOS ILUMINADOS ME ESCRIBEN DE cuando en cuando para contarme su propia teoría del todo. «Einstein estaba equivocado», comienzan —¿por qué siempre la toman con Einstein?, ¿acaso no hay otros físicos a los que malinterpretar?—. «La masa no es un número, sino un vector tridimensional —el *vector de Rodrigo*— generado por una partícula vectorial a la que denominaré *rodrigón*.» Acto seguido, Rodrigo se pierde en un mar de detalles sobre la manera en que su *teoría de la rodriguidad* explica la superconductividad, la autoconsciencia y las pirámides aztecas.

Lo que todos estos individuos obvian es que, para que una nueva teoría física pueda ser tomada en serio, no solo ha de explicar los fenómenos que aún no entendemos, sino también todo lo demás. De acuerdo, supongamos que la nueva teoría fija la temperatura crítica superconductora del $YBa_2Cu_3O_7$ en 93 kelvin. ¿Qué dice sobre la temperatura crítica del hierro? ¿Y sobre la radiación del cuerpo negro? ¿Predice la dilatación del tiempo o el efecto fotoeléctrico? Es más, ¿qué implica la nueva teoría para experimentos que aún no se han llevado a cabo? ¿Podemos falsarla?

Si nos atenemos a estas condiciones, proponer una teoría alternativa a la física cuántica puede parecer una tarea titánica. O, peor aún, innecesaria: hasta ahora, la física cuántica ha resistido todos los intentos por refutarla. Predice con exactitud el espectro de los elementos químicos, permite calcular el campo magnético generado por un electrón con una precisión de una parte en mil millones, explica los experimentos que se llevan a cabo en los aceleradores de partículas e incluso la expansión del universo temprano. ¿Qué necesidad hay de reemplazarla por otra?

Sin embargo, existen varios motivos para pensar que la física cuántica podría no ser una teoría fundamental. A continuación mencionaré dos.

El primero es histórico. Basta con que alguien afirme haber dado con una «teoría final» para que aparezca algún fenómeno nuevo que su modelo no puede explicar. Así ocurrió con el modelo geocéntrico, con el copernicano, con las leyes de Newton, con la naturaleza ondulatoria de la luz y con las primeras teorías sobre la evolución del universo. ¿Por qué no iba a ocurrir lo mismo con la física cuántica? Sería muy presuntuoso pensar que unos mamíferos que no hace tanto que abandonaron las copas de los árboles hayan descubierto el misterio último del cosmos.

La segunda razón es que, a pesar de todos sus éxitos, hay fenómenos que no parecen tener cabida en el formalismo cuántico. Fenómenos que, de hecho, resultan de enorme importancia para la vida en el universo. La física de partículas ha conseguido integrar las interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes en una teoría cuántica llamada modelo estándar. Sus predicciones son verificadas cada día en los grandes aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra. Sin embargo, y pese al duro trabajo de miles de físicos brillantes, todos los intentos por formular una teoría cuántica de la gravedad han conducido a modelos no predictivos.

EN SÍNTESIS

Desde hace ochenta años, las predicciones de la física cuántica se han visto confirmadas en un sinnúmero de experimentos. La mayoría de los investigadores opinan que no hay nada que el formalismo cuántico no pueda explicar.

La teoría cuántica es también extraordinariamente robusta: hasta ahora, todos los intentos por modificarla han dado lugar a teorías que violan algún principio básico, como la imposibilidad de transmitir información de manera instantánea.

Un nuevo programa de investigación, conocido como reconstrucción de la teoría cuántica, intenta determinar hasta qué punto las leyes cuánticas son las únicas compatibles con una serie de requisitos físicos esenciales.

Varios estudios recientes sugieren que es posible concebir «teorías probabilísticas generalizadas» más amplias que la física cuántica pero que, sin embargo, no violan ningún principio fundamental. Tales teorías parecen guardar una intrigante relación con la formulación microscópica de la gravedad.

Durante los últimos años, los avances en información cuántica han hecho surgir un nuevo programa de investigación cuyo objetivo consiste en deducir las leyes cuánticas a partir de primeros principios. Dichos principios incluyen algunos postulados considerados «irrenunciables», como la imposibilidad de enviar información de manera instantánea entre puntos distantes del espacio (lo que violaría el principio de causalidad) o que no deberíamos poder comunicar información compleja empleando únicamente un bit. Si fuera posible demostrar que las leyes cuánticas son las únicas compatibles con tales postulados, podríamos argumentar con buenas razones el carácter fundamental de la teoría. De hecho, a medida que esta línea de investigación avanzaba, el número de teorías plausibles fue reduciéndose cada vez más. Hasta hace poco, parecía que las únicas teorías razonables eran aquellas compatibles con la física cuántica.

Hace dos años, sin embargo, el autor de este artículo y otros investigadores demostramos que esa no es necesariamente la situación: parece haber teorías más generales que la física cuántica pero que, no obstante, no violan ningún requisito físico básico. Tales teorías «supracuánticas» parecen guardar, además, una intrigante relación con algunos intentos por describir la gravedad a escala microscópica. La construcción explícita de una de estas teorías constituye aún una tarea pendiente, pero contamos con buenas razones para pensar que deberían existir, al menos sobre el papel. De ser el caso, la teoría cuántica no sería la única concebible para explicar el universo, sino que habría otras. ¿Podría una de ellas describir nuestro mundo?

TEORÍAS CUÁNTICAS

Antes de proseguir conviene aclarar a qué nos referimos cuando hablamos de física cuántica. Esta expresión funciona como un comodín que engloba, no a una teoría física, sino a un número infinito de ellas. Para entenderlo, analicemos primero el caso de la física clásica.

Imaginemos un universo compuesto por nueve partículas con ciertas masas. Si postulamos que obedecen las leyes de Newton y que se atraen con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, habremos formulado una teoría clásica. De hecho, se trataría de una versión muy simplificada de la teoría que los astrónomos emplean a diario para explicar el movimiento de los planetas en el sistema solar. Si ahora cambiamos las interacciones que afectan a las partículas (postulando, por ejemplo, que se atraen con una fuerza proporcional a la distancia), su número, su masa o incluso las mismas ecuaciones de Newton (haciéndolas relativistas, pongamos por caso), obtendremos distintas teorías físicas. Sin embargo, todas ellas seguirían siendo teorías clásicas.

Así pues, ¿qué es la física clásica? Para entender lo que abarca este concepto, tenemos que abstraer lo que guardan en común todas esas teorías. Y es esto: en física clásica, el estado de un sistema queda determinado por una lista de números. En el ejemplo de arriba, dichos números serían la masa, la velocidad y la posición de cada partícula. Esa lista contiene todas las propiedades que caracterizan el sistema, las cuales evolucionan de acuerdo con una ecuación diferencial. Por último, cuando medimos una propiedad física —lo que en jerga técnica se conoce como un «observable»—, como la energía, nuestro dispositivo nos devuelve una cantidad que queda determinada unívocamente por esos valores.

En física cuántica las reglas son muy distintas. El estado de una partícula no queda descrito por una lista de números, sino por una función: la función de onda. Por su parte, los distintos observables se corresponden con otra clase de objetos matemáticos, denominados operadores. El operador asociado a la energía, por ejemplo, determina la manera en que el sistema evoluciona con el tiempo. Finalmente, la física cuántica no predice con certeza el resultado de una medida, sino solo la probabilidad de obtener tal o cual valor. Dicha probabilidad se calcula aplicando una regla, conocida como regla de Born, a la función de onda y al operador asociado al observable que deseamos medir.

Los primeros intentos de modificar la teoría cuántica fueron un homenaje a la falta de imaginación. En ausencia de intuición física, las consecuencias de modificar cualquiera de los axiomas de la física cuántica resultan muy difíciles de predecir

Nuestro fracaso a la hora de cuantizar la gravedad significa que no hemos sido capaces de encontrar una representación de los sistemas físicos en términos de funciones de onda y operadores que, a escala macroscópica, permita recuperar la relatividad general de Einstein (la formulación moderna, pero clásica, de la gravedad).

ISLOTE CUÁNTICO

Ahora bien, ese enfoque podría estar viciado. ¡Nadie nos promete que la gravedad pueda describirse mediante funciones de onda y operadores! ¿No estaremos caminando en círculos? Quizá deberíamos empezar a cuestionar la idea de que la física que rige nuestro universo deba quedar descrita por una teoría cuántica y, en su lugar, explorar otras opciones.

¿Cómo podrían ser esas opciones? Los primeros intentos de modificar la teoría cuántica fueron un homenaje a la falta de imaginación. ¿Que la evolución de un estado cuántico queda descrita por una ecuación lineal? Añadamos un término no lineal y veamos qué ocurre (sucede que la teoría resultante permite la comunicación instantánea entre dos puntos arbitrariamente lejanos). ¿Que la regla de Born dicta que hemos de calcular sumas de números al cuadrado? Efectuemos sumas de números a la cuarta y examinemos las consecuencias (en ese caso, la teoría permitiría la existencia de sistemas con un poder computacional ilimitado). El hecho de que estas y otras modificaciones peregrinas de la mecánica cuántica desembocasen en auténticos disparates provocó que muchos expertos

se preguntasen si la teoría cuántica era «una isla en el espacio de teorías físicas».

Pero tal vez esté siendo demasiado duro con esos investigadores. Las leyes de la física cuántica (las que determinan qué es un estado y qué es un observable) están formuladas en términos matemáticos abstractos y muy poco intuitivos. Por eso hacer divulgación resulta tan difícil. Y, también por eso, cuando un físico contempla generalizar la mecánica cuántica, lo primero que le viene a la cabeza no son consideraciones sobre la naturaleza del universo, sino conceptos matemáticos que aprendió en primero y cuarto de carrera. Y en ausencia de intuición física, las consecuencias de modificar cualquiera de los axiomas de la teoría cuántica resultan muy difíciles de predecir.

Es posible formular teorías probabilísticas coherentes que, sin embargo, no guardan ninguna relación con la física cuántica

La complejidad de proponer alternativas viables a la física cuántica, sumada a su extraordinario poder predictivo, hizo que gran parte de los investigadores la aceptasen como un credo casi desde sus orígenes, en los años veinte y treinta del siglo xx. Durante décadas, las escasas incursiones en los fundamentos de la física cuántica se centraron en buscar interpretaciones que permitiesen aprovechar las lecciones aprendidas de la física clásica, o, por el contrario, en poner de manifiesto las diferencias entre una y otra.

TEORÍAS PROBABILÍSTICAS GENERALIZADAS

Esa situación de inmovilismo cambió radicalmente a finales del siglo xx, cuando los teóricos de la información cuántica tomaron las riendas de la física fundacional. La teoría de la información cuántica constituye un marco general que intenta caracterizar qué tareas pueden realizarse en un sistema cuántico y cuáles no. Por ejemplo, no podemos medir con total precisión la posición y la velocidad de una partícula, no podemos predecir el resultado de una medida, y tampoco podemos copiar información cuántica. Sin embargo, es posible teletransportar estados cuánticos, generar números aleatorios y transmitir información secreta [*véase* «Los límites físicos de la privacidad», por Artur Ekert y Renato Renner; Investigación y Ciencia, enero de 2016]. En los años noventa, los teóricos de la información cuántica empezaron a adoptar este punto de vista, más operacional que conceptual, para entender qué podría haber más allá de la física cuántica.

Una de las aportaciones más interesantes de este enfoque fue la formulación de «teorías probabilísticas generalizadas» (TPG). El objetivo de una TPG consiste en describir qué observaría un experimentador si preparase un sistema físico de cierta manera, lo dejase evolucionar en el tiempo y midiese luego sus propiedades. Todo ello sin entrar en las consideraciones ontológicas del tipo «¿pero qué estamos midiendo realmente?» que habían caracterizado —y, hasta cierto punto, lastrado— la física fundacional.

Así pues, una TPG queda definida por el conjunto de estados que puede adoptar un sistema físico (ya se trate de vectores, funciones de onda u ositos de gominola), junto con una regla de composición para describir sistemas compuestos. Los objetos matemáticos que representan las medidas y las posibles evoluciones del sistema quedan determinados por la estructura de dicho espacio de estados. Por último, una medida se asocia a alguna regla que asigne a cada estado de la teoría un número comprendido entre 0 y 1. Ese número se interpreta como la probabilidad de obtener un resultado cuando medimos un sistema preparado en el estado en cuestión. En particular, tanto la física cuántica como la clásica admiten una descripción en términos de TPG. Los estados de la primera vendrían dados por funciones de onda; los de la segunda, por vectores correspondientes a la posición y la velocidad de cada partícula.

Lo fascinante es que el formalismo de las TPG también da cabida a teorías físicas coherentes que, sin embargo, no guardan ninguna relación con la física cuántica. Un ejemplo curioso lo hallamos en la «teoría de cubos», desarrollada en 2013 por Borivoje Dakić, de la Universidad de Viena, y sus colaboradores. Esta teoría generaliza a tres dimensiones —de ahí su nombre— la «matriz densidad», uno de los objetos matemáticos básicos del formalismo cuántico. Como consecuencia, permite fenómenos de interferencia de tercer orden, los cuales se pondrían de manifiesto en un experimento de triple rendija. Tales efectos, sin embargo, no ocurren en mecánica cuántica.

Realista o no, la teoría de Dakić y sus colaboradores muestra que es posible construir teorías probabilísticas que van más allá de la física cuántica. Una valiosa lección que nos han enseñado las TPG es que ciertos fenómenos que tradicionalmente se consideraban característicos de la mecánica cuántica, como el teletransporte, la imposibilidad de copiar estados y la existencia de comunicaciones seguras, son en realidad muy frecuentes en el espacio de teorías. Existen numerosos ejemplos de TPG no cuánticas que, sin embargo, permiten teletransportar estados, prohíben copiar información y garantizan la comunicación secreta.

No obstante, todas las TPG no cuánticas exploradas hasta la fecha adolecen de algún problema. Algunas, por ejemplo, predicen que la evolución de un sistema de varias partículas no puede descomponerse como una sucesión de interacciones entre pares de partículas. Otras no quebrantan ninguna intuición física, pero los experimentos de óptica cuántica las refutan.

RECONSTRUIR LA TEORÍA CUÁNTICA

Una vez más, la comunidad científica empezaba a sospechar que la teoría cuántica quizá fuese la única capaz de describir el mundo. Esta conjetura se convirtió en el punto de partida de un ambicioso programa de investigación denominado «reconstrucción de la teoría cuántica». Su objetivo consiste en demostrar que todas las TPG que satisfacen unos mínimos requisitos físicos pueden interpretarse como una teoría cuántica.

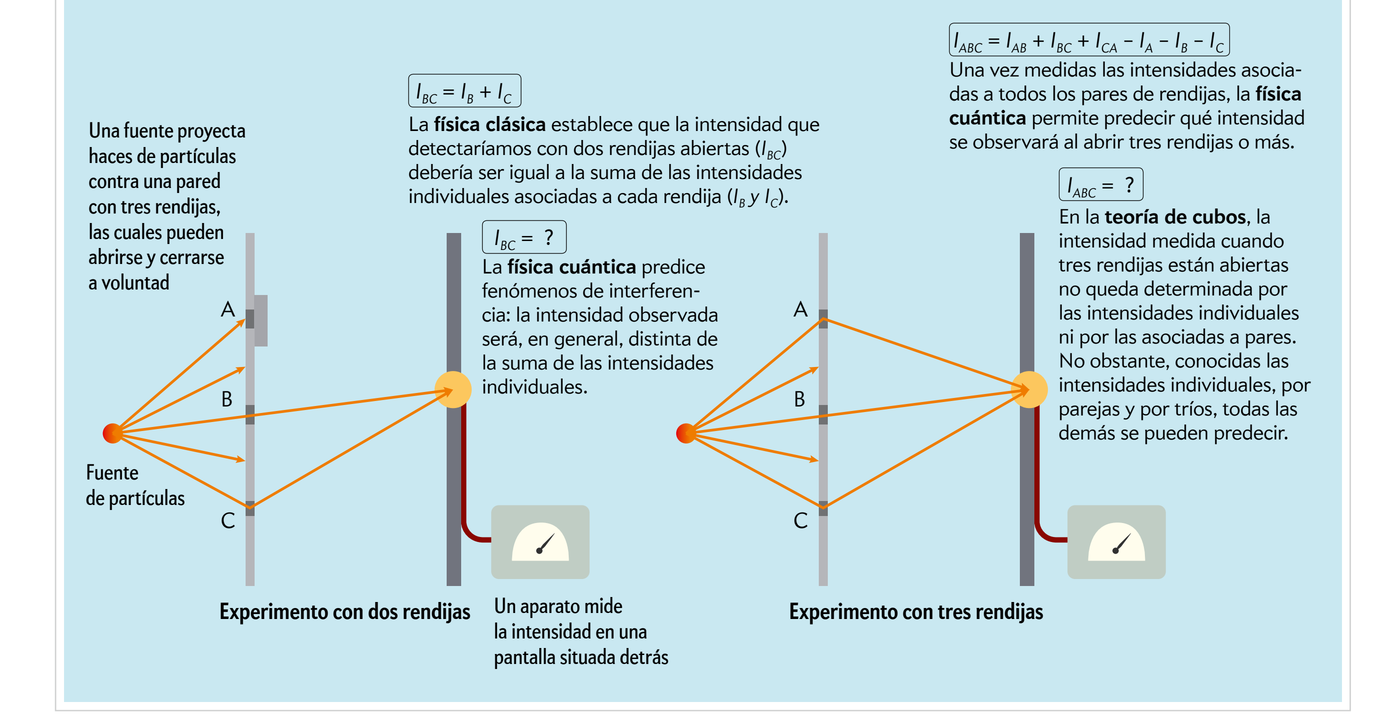
Para que el lector se haga una idea de a qué clase de requisitos nos estamos refiriendo, a continuación presentamos los sugeridos por Dakić y Časlav Brukner, de la Universidad de Viena.

El primero recibe el nombre de *tomografía local*: el estado de un sistema compuesto ha de poder determinarse midiendo las propiedades de cada uno de los subsistemas constituyentes y evaluando las posibles correlaciones entre los resultados. El segundo es el de *reversibilidad*: para cualquier par de estados

Ni clásica ni cuántica

Una de las principales características de la física cuántica es que no predice con certeza el resultado de un experimento, sino solo probabilidades. Sin embargo, es posible formular otras teorías físicas coherentes que comparten ese carácter probabilístico, pero cuyas predicciones se alejan de las de la mecánica cuántica. En los últimos años, el análisis de estas «teorías probabilísticas generalizadas» ha ayudado a entender mejor los fundamentos de la física cuántica. Por ejemplo, se ha observado que algunos fenómenos que se consideraban característicos de la mecánica cuántica (como el teletransporte, la imposibilidad de copiar estados o la comunicación secreta) son en realidad muy comunes en el espacio de teorías.

Un ejemplo de teoría probabilística no cuántica es la «teoría de cubos», desarrollada en 2013 por Borivoje Dakić, de la Universidad de Viena, y sus colaboradores. El diagrama que reproducimos a continuación ilustra las diferencias entre las predicciones de la física clásica, la física cuántica y la teoría de cubos en el caso de un experimento de interferencia con dos y tres rendijas. A diferencia de la física clásica, la física cuántica predice fenómenos de interferencia de segundo orden (*izquierda*). Y, al contrario que la física cuántica, la teoría de cubos predice fenómenos de interferencia de tercer orden (*derecha*).



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

de la TPG, existe una transformación reversible que lleva de uno a otro. El tercero hace referencia a la *capacidad informativa* de la teoría: en todo sistema físico que solo permita distinguir con certeza entre dos estados, solo puede almacenarse un bit de información. Por último, la teoría ha de ser de *dimensión finita*: basta una lista finita de parámetros para determinar el estado de un sistema.

En 2009, estos investigadores demostraron que las únicas TPG que satisfacen los cuatro principios mencionados son teorías cuánticas. Podríamos pensar que el trabajo de Dakić y Brukner terminó con el debate sobre la existencia de una teoría coherente y compatible con los experimentos distinta de la física cuántica, pero no fue así. La controversia se debe a los dos últimos axiomas.

Examinemos el tercero, la capacidad informativa. Este principio no es tan inocuo como pudiera parecer, ya que es posible que un sistema posea infinitos pares de estados que se pueden distinguir —lo que, en principio, nos daría la posibilidad de almacenar infinitos bits—, pero que, al mismo tiempo, no contenga tres estados distinguibles. De hecho, esto es lo que sucede en física cuántica cuando consideramos el espín de un electrón. El espín puede entenderse como una propiedad de la partícula que, dada una dirección del espacio elegida a voluntad, puede tomar dos valores: 1/2 y –1/2. De este modo, a cada dirección en el espacio le corresponden dos estados electrónicos que se pueden distinguir. A priori podríamos pensar que, si preparamos un electrón de la manera adecuada en dos direcciones distintas del espacio, podríamos almacenar dos bits de información. Después, solo tendríamos que medir el espín en una dirección o en la otra para conocer el bit en cuestión. Sin embargo, esto no violaría la hipótesis de que solo pueden distinguirse dos estados, ya que el experimentador únicamente tendría acceso a uno de los bits.

El tercer axioma prohíbe justo eso. Y, de hecho, así ocurre en todas las teorías cuánticas. Ahora bien, que la física cuántica satisfaga este principio no implica que una teoría futura no vaya a violarlo. ¿Tan extraño sería poder almacenar dos bits de información en un sistema que, en realidad, posee infinitos

estados? Es más, una teoría física ni siquiera tiene por qué contener sistemas que solo permitan distinguir entre dos estados. ¡Pensemos en la física newtoniana!

El cuarto axioma resulta aún más problemático, ya que las únicas teorías cuánticas que lo satisfacen son las teorías cuánticas finitas. Estas permiten describir multitud de fenómenos físicos, desde la magnetización y el comportamiento de la luz polarizada hasta el funcionamiento de un ordenador cuántico. Aplicadas a las partículas subatómicas, sin embargo, resultan desastrosas: todas ellas predicen la posibilidad de transmitir información de manera instantánea entre dos regiones distantes del espacio, por lo que violan el principio de causalidad, la piedra angular de la teoría de la relatividad de Einstein. No en vano, la física de partículas moderna se fundamenta en la teoría cuántica de campos, un marco teórico compatible con la relatividad especial gracias a que asigna, a cada punto del espacio, un número infinito de grados de libertad.

La inclusión de principios físicos dudosos y la exclusión de las teorías cuánticas infinitas no son síntomas característicos de la reconstrucción de Dakić y Brukner, sino de todas las reconstrucciones de la teoría cuántica propuestas hasta la fecha. Parece, pues, que nos hemos atascado de nuevo. ¿Es posible tomar otro camino?

FÍSICA DE CAJAS NEGRAS

Tanto los axiomas de Dakić y Brukner como los propuestos por otros autores hacen referencias explícitas a la estructura del espacio de estados de la TPG. El problema radica en que no tenemos acceso directo a dicha estructura, la cual vendría a ser la realidad última del universo. Por ello, resulta discutible si condiciones como el tercer axioma son «naturales» o siquiera refutables —¿cómo podemos estar seguros de que el sistema que estamos estudiando no permite distinguir más de dos estados?—. Debido a estas dificultades, en los últimos años ha nacido una nueva línea de investigación que, como complemento al estudio de las TPG, intenta caracterizar las teorías físicas desde una descripción mucho más básica.

Analicemos qué ocurre durante un experimento. En esencia, un sujeto prepara su montaje (mesa óptica, acelerador de partículas, muestra de grafeno, etcétera) de una forma determinada, a la que llamaremos x. Al concluir, obtiene un resultado, que denominaremos a. Si el experimentador repite el proceso múltiples veces, podrá calcular la probabilidad de obtener el resultado a en el experimento x. Esto es lo único que sabemos con certeza: todo lo demás (cuestiones como «un electrón ha impactado en el detector» y consideraciones similares) no son más que suposiciones o interpretaciones nuestras. Así pues, un experimento puede entenderse como una caja negra en la que introducimos un símbolo (en este caso, el tipo de experimento, x) y obtenemos un resultado (a). Esta observación constituye el punto de partida de la llamada «física de cajas negras».

El nuevo enfoque se basa en estudiar qué clase de correlaciones pueden surgir entre los resultados de experimentos efectuados en laboratorios distantes. Supongamos que dos físicos, Arturo y Begoña, cada uno en su laboratorio, llevan a cabo sendos experimentos y obtienen sus respectivos resultados. Si repiten el procedimiento un gran número de veces y comparan los datos, podrán calcular hasta qué punto los resultados estaban correlacionados. En física cuántica, por ejemplo, sabemos que aparecen correlaciones no triviales cuando Arturo y Begoña miden las propiedades de un par de partículas entrelazadas.

¿Que ocurrirá en un caso general? En principio, las distintas teorías físicas establecerán límites diferentes al conjunto de correlaciones posibles. El objetivo de la física de cajas negras es averiguar qué limitaciones corresponden a cada teoría.

Si al lector este enfoque le parece limitado, tenga en cuenta que hace poco ha sido empleado para refutar todas las teorías clásicas. En 1964, John Bell, investigador del CERN, demostró que, en cualquier teoría clásica, las posibles correlaciones entre experimentos distantes debían obedecer una serie de relaciones matemáticas, hoy conocidas como «desigualdades de Bell». El año pasado, tres experimentos llevados a cabo en la Universidad de Delft, la Universidad de Viena y el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) estadounidense demostraron definitivamente que la naturaleza viola dichas desigualdades [*véase* «Un test de Bell sin escapatorias», por Carlos Abellán, Waldemar Amaya y Morgan Mitchell; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2016]. Tales resultados implican que ninguna teoría futura podrá ser clásica —lo cual significa que, en efecto, «Einstein estaba equivocado».

¿Qué condiciones podríamos pedir a las correlaciones entre experimentos distantes si queremos que se correspondan con una teoría física razonable? Una restricción muy obvia es que dichas correlaciones no deberían permitirnos transmitir información de manera instantánea entre puntos distantes. Hace unos años, sin embargo, Sandu Popescu, ahora en la Universidad de Bristol, y Daniel Rohrlich, de la Universidad Ben Gurión, en Israel; y, de manera independiente, Boris Tsirelson, de la Universidad de Tel Aviv, hicieron notar que este «principio de no señalización» (la imposibilidad de transmitir señales de manera instantánea) no bastaba para caracterizar todas las correlaciones cuánticas. Al menos sobre el papel, es posible escribir correlaciones que satisfacen el principio de no señalización pero que, sin embargo, no se pueden generar en ninguna teoría cuántica, ni siquiera de manera aproximada [*véase* «¿Qué bit tiene mi vecino?», por Antonio Acín y Mafalda Almeida; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2013].

Algunas de esas correlaciones no cuánticas resultaban tan extrañas que la comunidad comenzó a dudar de que pudieran darse en una teoría física razonable. En 1999, Wim van Dam, ahora en la Universidad de California en Santa Bárbara, señaló que algunas de esas correlaciones, generadas por las llamadas «cajas de Popescu-Rohrlich», convertirían la evaluación no local de funciones en una tarea trivial.

Para descifrar esta última frase, consideremos el siguiente ejemplo. Arturo y Begoña desean ir a ver juntos una obra de

Indicios de una nueva teoría

Otra manera de explorar el espacio de teorías físicas plausibles consiste en considerar el grado de correlación entre experimentos efectuados en laboratorios distantes. En general, distintos principios físicos establecerán límites diferentes sobre cuán fuertes pueden ser esas correlaciones. En los últimos años, varios grupos de investigación han intentado averiguar si existe algún conjunto de requisitos básicos que implique las mismas correlaciones que las que genera la mecánica cuántica. Tales requisitos incluyen, por ejemplo, la imposibilidad de enviar información de manera instantánea entre dos puntos distantes.

Ese análisis de las correlaciones no tiene en cuenta los detalles de los experimentos: estos solo se ven como «cajas negras» en las que se introducen ciertos datos y se obtienen otros (*izquierda*). Las distintas correlaciones pueden representarse en un diagrama que refleja los principios básicos con los que son compatibles (*derecha*). En un trabajo teórico reciente, el autor y sus colaboradores han descrito un conjunto de correlaciones ligeramente más generales que las cuánticas, que, sin embargo, no parecen violar ningún principio físico. Su existencia sugiere la posibilidad de formular una teoría más fundamental que la física cuántica.

Cajas negras: Desde un punto de vista operacional, un experimento puede entenderse como una «caja negra» en la que un observador introduce un símbolo (*x*, que denota el tipo de experimento que se dispone a realizar) y obtiene un resultado (*a*).

Las características de las correlaciones quedan representadas mediante un punto en el diagrama de la derecha

Arturo
Begoña
x *a* *b* *y*

Correlaciones causales: Conjunto de correlaciones que no permiten enviar información de manera instantánea. Sin embargo, no todas ellas se consideran físicas, ya que algunas permiten comunicar información compleja con un solo bit.

Correlaciones casi cuánticas: Máximo conjunto conocido de correlaciones que no violan ningún principio básico.

Correlaciones cuánticas

Correlaciones clásicas

Arturo y Begoña realizan sendos experimentos (*x*, *y*) y obtienen sus resultados (*a*, *b*). Si repiten el proceso muchas veces, podrán calcular qué grado de correlación guardan los datos. En física cuántica, tales correlaciones aparecen cuando Arturo y Begoña miden las propiedades de partículas entrelazadas.

Si las correlaciones que observan Arturo y Begoña quedan fuera de la primera zona, sus experimentos no podrán describirse en ninguna teoría clásica. Si quedasen fuera de la segunda, no podrían aparecer en ninguna teoría cuántica.

teatro. El problema es que ambos tienen la agenda muy apretada y que, por motivos que no vienen al caso, el teléfono de Begoña solo puede recibir mensajes, no enviarlos; es decir, únicamente Arturo puede mandar información. ¿Cómo podría Begoña averiguar si existe una posibilidad de quedar?

Cabría pensar que la única solución es que Arturo le envíe un *whatsapp* muy largo a Begoña indicando qué días y a qué horas estará libre durante todo el mes. Sin embargo, si Arturo y Begoña compartiesen varios pares de cajas de Popescu-Rohrlich, Arturo solo tendría que mandar *un bit* de información. Es más, Van Dam demostró que, si tales cajas realmente existiesen en la naturaleza, cualquier protocolo de comunicación que resultase en una respuesta del tipo «sí» o «no» solo requeriría transmitir un bit. Esta posibilidad no solo está prohibida por las leyes cuánticas, sino que resulta poco plausible a los ojos de la mayoría de los investigadores en el campo.

La observación de Van Dam llevó a Noah Linden, de la Universidad de Bristol, y a otros investigadores a proponer un nuevo principio físico: la «no trivialidad de la complejidad de la información». Este requisito viene a decir que ninguna cantidad fija de bits basta para resolver con una alta probabilidad todas las tareas de comunicación posibles. A partir de él, Linden y sus colaboradores demostraron que muchas de las cajas no cuánticas identificadas por Popescu y Rohrlich no podrían existir en ninguna teoría física razonable. Con todo, los autores dejaron abierto el problema de si cualquier par de cajas no cuánticas violaría la no trivialidad de la complejidad de la información. De ser el caso, sabríamos con certeza que toda teoría futura sería indistinguible de la física cuántica, al menos en lo referente al grado de correlación entre distintos experimentos.

RINCÓN SUPRACUÁNTICO

Durante los años siguientes, la no trivialidad de la complejidad de la información fue seguida de una lista de principios físicos orientados a acotar el conjunto de cajas plausibles: el principio de no ventaja en computaciones no locales, la causalidad informativa, la localidad macroscópica, la ortogonalidad local. Cada uno de ellos consiguió reducir más y más el conjunto de cajas «razonables». Gracias a estos estudios, hoy sabemos que cualquier teoría física futura no podrá presentar unas correlaciones muy distintas de las que genera la física cuántica. Y, sin embargo, la demostración de que alguno de estos principios (o

todos a la vez) era suficiente para determinar el conjunto de cajas cuánticas no acababa de llegar.

Esa situación cambió hace dos años, cuando Yelena Guryanova, de la Universidad de Bristol, Matty Hoban, de la de Oxford, Antonio Acín, del Instituto de Ciencias Fotónicas de Barcelona, y el autor de este artículo analizamos un nuevo conjunto de cajas negras. Bautizadas como cajas «casi cuánticas», dicho conjunto es solo ligeramente mayor que el cuántico: incluye todas las cajas cuánticas, pero también algunas que no tienen cabida en ninguna teoría cuántica. Sin embargo, hay pruebas de que satisface todos los principios propuestos hasta ahora para caracterizar las posibles correlaciones físicas. En otras palabras: no parece haber ninguna razón profunda que nos impida fabricar cajas casi cuánticas.

Al mismo tiempo, el conjunto casi cuántico presenta varias características muy interesantes. En primer lugar, si combinamos varias cajas casi cuánticas, la «metacaja» resultante es también casi cuántica; es decir, el nuevo conjunto de cajas es cerrado bajo operaciones físicas. Además, existe un procedimiento sencillo para averiguar si un par de cajas es casi cuántico o no. No sucede lo mismo con las cajas cuánticas: de hecho, se conjetura que este último problema es indecidible; esto es, que no existen algoritmos generales para resolverlo. Por último, ciertas consideraciones sobre cómo extender la teoría de la relatividad general a escala microscópica sugieren que las correlaciones que no son casi cuánticas no pueden ser físicas.

Tal vez el hecho de que las correlaciones casi cuánticas exhiban estas propiedades tan convenientes no sea casualidad, sino que se deba a que realmente hay una teoría física subyacente que las genera. Dicha teoría resultaría muy similar a la física cuántica, al menos en lo que se refiere a las correlaciones entre experimentos distantes. Sin embargo, debido a las dos últimas propiedades listadas arriba, ¡sería más factible que la física cuántica!

En la actualidad estamos buscando la formulación explícita de una TPG que presente correlaciones casi cuánticas. La existencia, aunque solo fuese a nivel teórico, de dicha teoría supondría confirmar lo que algunos de nosotros siempre hemos sospechado: que la física cuántica no es la única teoría concebible. O, en términos más alegóricos, que Dios tuvo más de una opción a la hora de crear el mundo. IyC

PARA SABER MÁS

Quantum nonlocality as an axiom. Sandu Popescu y Daniel Rohrlich en *Foundations of Physics*, vol. 24, págs. 379-385, marzo de 1994.
Nonlocality & communication complexity. Wim van Dam, tesis doctoral. Universidad de Oxford, 1999.
A glance beyond the quantum model. Miguel Navascués y Harald Wunderlich en *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 466, págs. 881-890, noviembre de 2009.
Quantum theory and beyond: Is entanglement special? Borivoje Dakić y Časlav Brukner en *Deep beauty: Understanding the quantum world through mathematical innovation*, dirigido por H. Halvorson. Cambridge University Press, 2011.
Almost quantum correlations. Miguel Navascués et al. en *Nature Communications*, vol. 6, art. n.° 6288, enero de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Teoría cuántica y realidad. Bernard D'Espagnat en *IyC*, enero de 1980.
Procesamiento cuántico de la información. Antonio Acín en *IyC*, septiembre de 2006.
La realidad de los cuantos. Anton Zeilinger en *IyC*, junio de 2009.

SIETE AÑOS DE MISIÓN PARA REUNIR 60 GRAMOS DE ASTEROIDE



SISTEMA SOLAR

El viaje de la sonda *OSIRIS-REx* al asteroide Bennu aportará respuestas a preguntas sobre nuestro pasado más lejano y nuestro posible futuro

Dante S. Lauretta

EN SÍNTESIS

Los asteroides son restos prístinos del nacimiento del sistema solar que ofrecen respuestas a preguntas aún sin respuesta sobre la formación de planetas, y quizás incluso sobre los orígenes de la vida.

Presentan oportunidades y también peligros: los asteroides contienen metales, agua y compuestos orgánicos que podríamos explotar, pero unos pocos podrían chocar contra la Tierra.

Ya sea por motivos científicos, económicos o de seguridad, recoger muestras de asteroides y traerlas de vuelta a nuestro planeta para su estudio constituye la próxima meta en la investigación de asteroides.

BRYAN CHRISTIE



COMO UN COLIBRÍ que se cierne sobre una flor, la nave espacial *OSIRIS-REx* tratará de recoger en 2019 muestras de la superficie rica en carbono de Bennu. Será la misión de toma de muestras de asteroide más ambiciosa que se haya intentado, y la primera de Estados Unidos.

Dante S. Lauretta es profesor de ciencias planetarias en la Universidad de Arizona. Entre sus principales intereses investigadores se encuentran la formación de planetas habitables y la probabilidad de que la vida haya surgido en otras partes del universo.



En 1999 se descubrió un asteroide que quizá sea el más amenazador que se conoce. Describe una órbita inestable que cruza periódicamente la que la Tierra sigue alrededor del Sol. Los astrónomos le pusieron a este objeto de medio kilómetro de diámetro el nombre de Bennu, un dios de la creación en la mitología egipcia. En efecto: si cayese, repleto como está de compuestos orgánicos y minerales ricos en agua, en un mundo yermo, podría sembrar allí las semillas de la vida. Sin embargo, su destino quizá sea el de provocar un sufrimiento y una destrucción inmensos. Se calcula que en 2135 pasará más cerca de la Tierra que la Luna. Es posible que esa aproximación altere la trayectoria del asteroide de modo que acabe chocando contra nuestro planeta a finales del siglo XXII.

No se puede predecir en qué lugar exacto de la Tierra caería Bennu, aunque sencillos cálculos aritméticos demuestran que el impacto podría liberar una energía de 3000 megatones de TNT. Si su acercamiento de 2135 lo pone rumbo a una colisión con la Tierra, los líderes mundiales tendrían básicamente dos opciones para evitar el desastre: evacuar grandes regiones del planeta o lanzar una misión espacial que desviase el asteroide. Para saber lo grandes que tendrían que ser la evacuación o la misión de desvío, esos futuros estrategas dependerían en parte de datos reunidos más de un siglo antes por una nave espacial de la NASA que despegará este mes de septiembre. Su nombre es *OSIRIS-REx* y viajará a Bennu con el objeto de volver a la Tierra con muestras del asteroide.

LOS ORÍGENES DE *OSIRIS-REx*

Los asteroides, como reliquias de la formación del sistema solar, son emisarios de las profundidades más oscuras de nuestra historia. Transportan datos sobre sucesos cientos de millones de años anteriores al registro geológico de la Tierra que no se encuentran en ningún otro lugar. Las muestras de un asteroide podrían contener respuestas a preguntas aún abiertas sobre el nacimiento del Sol, la formación de los planetas e incluso los orígenes de la vida en la Tierra. Si a todo esto le sumamos la necesidad de protegernos contra los impactos catastróficos de asteroides, resultará obvio por qué los científicos se interesan por estos objetos.

Lo que no es tan evidente es por qué hay que enviar una sonda espacial en una misión de ida y vuelta para recoger una muestra, cuando a la Tierra caen continuamente fragmentos de asteroides (lo que llamamos meteoritos). El problema es que pocos de estos son prístinos, si es que hay alguno que lo sea. Todos deben soportar una abrasadora entrada en la atmósfera de la Tierra, que derrite su superficie, y la mayoría ha de aguardar durante años, siglos o milenios a que se los encuentre; así, la exposición prolongada al viento y la lluvia va borrando poco a poco las desconocidas historias que podrían contarnos. La mayoría de los asteroides, por el contrario, han permanecido miles de millones de años en un estado que el ambiente estéril del espacio profundo apenas si modifica. Visitarlos es la única manera de acceder a la información que contienen.

Y entre los asteroides, Bennu es un caso especial. La mayoría de los fragmentos de meteoritos que llenan los museos de la Tierra están compuestos de roca y metal, materiales suficientemente resistentes como para sobrevivir a la caída hasta la superficie de nuestro planeta. Bennu, en cambio, es una masa negra como el carbón formada por delicados compuestos orgánicos. Estos compuestos carbonáceos podrían ser los precursores de la bioquímica basada en el carbono de nuestro planeta. Los científicos querrían estudiar Bennu incluso aunque no fuera peligroso. Pero lo es... y precisamente porque Bennu pasa tan alarmantemente cerca de nuestro planeta, es posible enviar una misión que vuelva de allí con muestras.

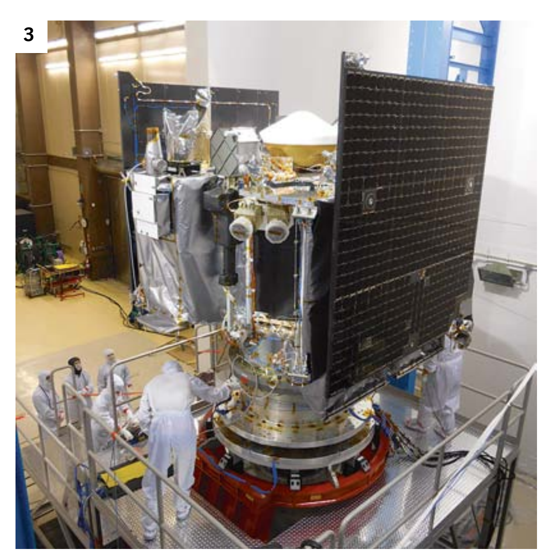
La historia de Bennu se remonta al menos a hace mil millones de años, cuando nació como una pila de escombros, expelidos desde un protoplaneta que giraba entre Marte y Júpiter y al que destrozó por un impacto. La de *OSIRIS-REx* no comienza hasta febrero de 2004, cuando yo solo era un profesor ayudante en su tercer año que trabajaba en el Laboratorio Lunar y Planetario de la Universidad de Arizona. La compañía aeroespacial Lockheed Martin le propuso a mi jefe, Michael J. Drake, que fuera el investigador principal de una misión de la NASA concebida para traer muestras de asteroide, y Drake me pidió que fuese su segundo.

Mi primer trabajo para la misión fue establecer su justificación científica. Llevaba más de un decenio estudiando meteoritos; sabía cuáles eran todas las preguntas sobre ellos que solo se podían responder con una muestra de material prístino de un tamaño apreciable. En ese momento solo había otro proyecto equiparable al nuestro: la misión Hayabusa, de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, que en 2005 fue hasta el asteroide Itokawa para recoger muestras. Hayabusa solo supuso un éxito parcial. La sonda logró reunir 1500 granos minerales microscópicos, mucho menos de lo esperado —¡obtener muestras de un asteroide no es fácil!—. Además, Itokawa era un objeto









EL VIAJE DE *OSIRIS-REx* a Bennu comenzó doce años antes de su lanzamiento, programado para septiembre de 2016. Primero se montó la nave espacial (*1*); más tarde se sometió a pruebas en cámaras de vacío (*2*) y laboratorios de acústica (*3*) en las instalaciones de la compañía Lockheed Martin Space Systems, en Colorado.

CORTESÍA DE LOCKHEED MARTIN CORPORATION (*1 y 3*); CORTESÍA DE SYMEON PLATTS, UNIVERSIDAD DE ARIZONA (*2*)

brillante y pétreo, con una historia y un potencial científico muy diferentes a los de los asteroides oscuros y carbonáceos como Bennu. Estábamos entrando en territorio ignoto.

Una noche, en casa, decidí hacer un esquema de los principales temas científicos de la misión y escribí cuatro palabras: orígenes, espectroscopía, recursos y seguridad. Con las muestras prístinas de un asteroide como Bennu aprenderíamos más sobre los orígenes de los planetas y hasta sobre los orígenes de la vida misma. Los estudios espectroscópicos de su «suelo» (su regolito) aumentarían las posibilidades de obtener una muestra útil desde el punto de vista científico, y también revelarían si Bennu contiene recursos valiosos que se puedan extraer algún día. Cuanto más lográramos aprender sobre la órbita, composición y otras características de Bennu, más posibilidades tendríamos de determinar si supone una amenaza para la Tierra y cómo podríamos desviarlo. En términos más generales, los datos de gran precisión, directos, tomados sobre el terreno, de una nave espacial enviada a Bennu nos permitirían determinar y controlar posibles errores de las observaciones con telescopios y de los modelos teóricos. Todo ello enriquecería los estudios sobre la amplia variedad de asteroides del sistema solar.

Ese esquema acabó por definir la misión y le proporcionó su más que complicado acrónimo: OSIRIS-REx viene, en inglés, de «Explorador de Regolito-Orígenes, Interpretación Espectral, Identificación de Recursos y Seguridad». El 25 de mayo de 2011, la NASA aprobó la misión OSIRIS-REx y el equipo se reunió para celebrar el éxito. Por desgracia, Drake falleció poco después, en septiembre de 2011. Fui yo quien lo reemplazó como investigador principal. El equipo de OSIRIS-REx trabaja todos los días en honor a Mike, sabiendo que estaría orgulloso de nosotros mientras nos preparamos para cruzar una nueva frontera científica.

DE LOS ORÍGENES DE LA VIDA A LA ECONOMÍA EXTRAPLANETARIA

El viaje de *OSIRIS-REx* comenzará en septiembre, cuando la nave espacial despegue desde Cabo Cañaveral, en Florida, a lomos de un cohete Atlas V. Viajará a través del sistema solar durante casi dos años antes de llegar a Bennu, en agosto de 2018. A continuación orbitará a su alrededor durante más de tres años, elaborará un mapa detallado del asteroide y recogerá, por último, una muestra de al menos 60 gramos.

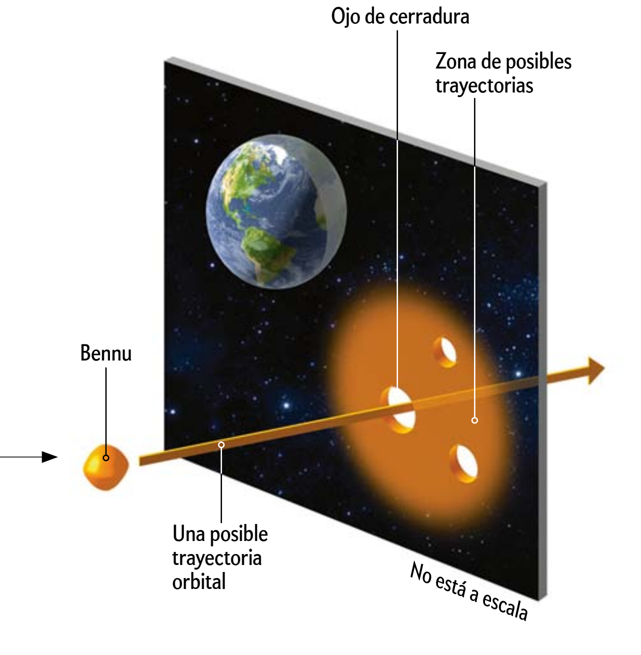
Las muestras que traerá *OSIRIS-REx* documentarán un enorme período de tiempo, desde antes de que existiera el sistema solar hasta hoy. Los minerales más antiguos de Bennu serán microscópicos granos «presolares», formados en los vientos estelares que manaban de estrellas moribundas y que acabaron por incorporarse al Sol y sus planetas. Los constituyentes más jóvenes serán minerales y compuestos alterados por impactos de micrometeoritos, rayos cósmicos y fulguraciones solares. *OSIRIS-REx* llevará a cabo estudios sin precedentes de estos procesos de «erosión espacial» en un asteroide carbonáceo.

Sin embargo, al igual que ocurre en otros asteroides carbonáceos, en Bennu habrá sobre todo moléculas orgánicas y minerales arcillosos ricos en agua, el mismo material que pen-

Continúa en la página 82

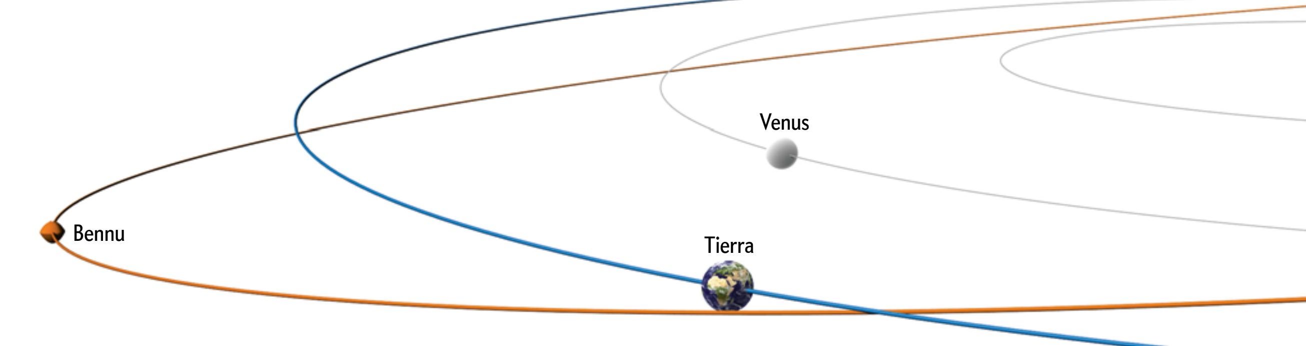
Muy cerca de un asteroide inquietante

En septiembre, la nave espacial de la NASA *OSIRIS-REx* se embarcará en un viaje interplanetario a Bennu, un asteroide cercano a la Tierra de medio kilómetro de diámetro y que algún día podría chocar con nuestro planeta **1**. Al aclarar las fuentes de inestabilidad en la órbita de Bennu, *OSIRIS-REx* revelará detalles importantes sobre el futuro, como la posibilidad de que el astro llegue algún día a impactar contra la Tierra y de qué forma cabría evitar esa colisión **2**. El objetivo principal de la misión, sin embargo, será recoger una muestra no contaminada de la antiquísima superficie de Bennu, rica en moléculas orgánicas que permitirán estudiar el pasado más distante y oscuro del sistema solar **3**.



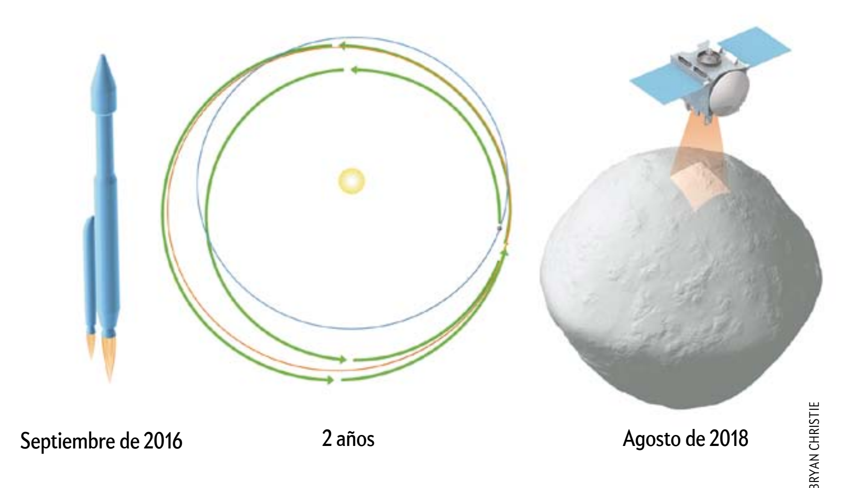
1 Demasiado cerca para relajarse

En el año 2135, Bennu llegará a estar más cerca de la Tierra que la Luna: pasará a unos 300.000 kilómetros de nuestro planeta. Durante ese acercamiento, el asteroide quizás atravesaría uno de los varios «ojos de cerradura» que rodean nuestro planeta, regiones de tamaño kilométrico en las que la gravedad de la Tierra alteraría la trayectoria de Bennu de modo que este acabaría chocando con ella en un futuro acercamiento. Si chocase contra la Tierra, Bennu podría liberar aproximadamente tanta energía como si detonasen todas las ojivas del arsenal nuclear de EE.UU.

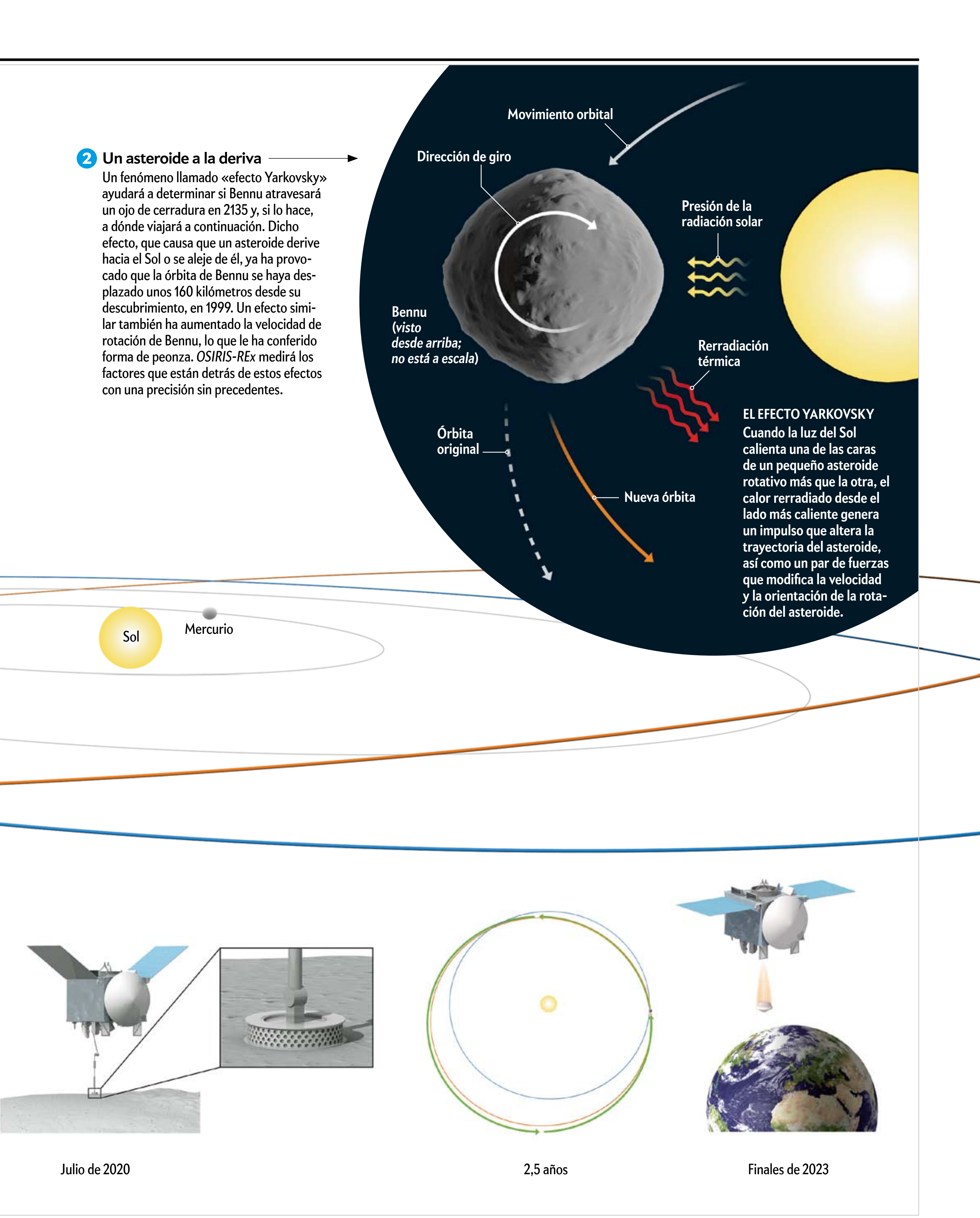


3 El viaje de *OSIRIS-REx*

Las observaciones del efecto Yarkovsky que realizará *OSIRIS-REx* surgirán de manera natural en el transcurso de su misión, mientras mide la forma, densidad y composición superficial de Bennu en busca de un punto para la recogida de muestras. Tras su lanzamiento en septiembre, la nave viajará durante dos años hasta Bennu; en su camino, pasará cerca de la Tierra en una ocasión para adquirir velocidad adicional. Cuando llegue a Bennu, en 2018, comenzará a cartografiar el asteroide para identificar posibles puntos donde tomar la muestra. La nave, que podría visitar uno de estos emplazamientos ya en julio de 2020, recogerá la muestra con un brazo retráctil durante una maniobra de «toque y despegue» de cinco segundos de duración. Después de un viaje de regreso de 2,5 años, *OSIRIS-REx* se desprenderá de la cápsula de muestras, que entrará en la atmósfera de la Tierra y descenderá hasta el desierto de Utah.



BRYAN CHRISTIE


2 Un asteroide a la deriva
Un fenómeno llamado «efecto Yarkovsky» ayudará a determinar si Bennu atravesará un ojo de cerradura en 2135 y, si lo hace, a dónde viajará a continuación. Dicho efecto, que causa que un asteroide derive hacia el Sol o se aleje de él, ya ha provocado que la órbita de Bennu se haya desplazado unos 160 kilómetros desde su descubrimiento, en 1999. Un efecto similar también ha aumentado la velocidad de rotación de Bennu, lo que le ha conferido forma de peonza. OSIRIS-REx medirá los factores que están detrás de estos efectos con una precisión sin precedentes.
Movimiento orbital
Dirección de giro
Presión de la radiación solar
Bennu (visto desde arriba; no está a escala)
Rerradiación térmica
Órbita original
Nueva órbita
EL EFECTO YARKOVSKY
Cuando la luz del Sol calienta una de las caras de un pequeño asteroide rotativo más que la otra, el calor rerradiado desde el lado más caliente genera un impulso que altera la trayectoria del asteroide, así como un par de fuerzas que modifica la velocidad y la orientación de la rotación del asteroide.
Sol
Mercurio
Julio de 2020
2,5 años
Finales de 2023

Viene de la página 79
samos que sirvió como materia prima para el ADN, el ARN, las proteínas y demás componentes básicos de la vida en la Tierra. Parte del agua de Bennu era líquida en el pasado, pues la desintegración radiactiva de isótopos de vida corta, como el aluminio 26 y el hierro 60, la mantenía caliente en el seno del asteroide. Un inmenso número de asteroides carbonáceos debió de caer en la Tierra en sus primeros tiempos prebióticos. Pero desde nuestro planeta no es fácil descubrir si esos asteroides realmente cocinaron la receta de la vida: aquí no hay rocas inalteradas lo suficientemente viejas como para que puedan hacérnoslo saber.

OSIRIS-REx no es solo una misión para descubrir nuestros más remotos orígenes; también recopilará información importante para nuestro futuro. Varias empresas y países están investigando seriamente la minería de asteroides como una solución a las limitaciones de recursos, tanto en la Tierra como fuera de ella: examinan posibles maneras de extraer metales preciosos para usarlos en nuestro planeta o de emplear hielo de agua para producir combustible de cohetes en el espacio. Con su capacidad de maniobrar alrededor de un asteroide y cartografiarlo de manera precisa, *OSIRIS-REx* servirá como explorador en terreno desconocido para futuras misiones de minería de asteroides.

LA AMENAZA DE BENNU

Aunque no sea su único propósito, es imposible sobreestimar la importancia que tiene *OSIRIS-REx* para la mejora de las predicciones de posibles impactos de asteroides y de los métodos para prevenirlos. Determinar si un asteroide chocará contra la Tierra requiere medir su órbita con una enorme precisión. Se entenderá la dificultad de esta tarea si consideramos las distancias y fuerzas implicadas. Bennu da una vuelta al Sol cada 1,2 años, viaja a una velocidad de más de 28 kilómetros por segundo y se aproxima a la Tierra cada seis años. En una sola órbita, este asteroide viaja más de mil millones de kilómetros; en su punto más lejano, se encuentra a más de 340 millones de kilómetros de la Tierra.

El hecho de que Bennu pase relativamente cerca de la Tierra de manera regular ha permitido a los astrónomos estudiar su órbita a fondo; ninguna está registrada con mayor precisión en los catálogos de asteroides. La incertidumbre en su semieje mayor (el radio de su órbita para sus dos puntos más separados) es de solo seis metros sobre una longitud total de 168.505.699,049 kilómetros. Eso equivale a medir la distancia entre Nueva York y Los Ángeles con una precisión de 0,3 milímetros. Sin embargo, no basta con conocer la órbita con exactitud, ya que existen numerosas fuerzas externas que pueden modificar la órbita de un asteroide.

Para trazar el rumbo de Bennu, el equipo de OSIRIS-REx usa modelos de gran precisión para calcular la influencia de todas las fuerzas sobre la órbita del asteroide. Deben tener en cuenta los efectos gravitatorios del Sol, la Luna y los ocho planetas, así como los de otros grandes asteroides y el planeta enano Plutón. Incluso el achatamiento de la Tierra importa, ya que induce variaciones significativas en la trayectoria de un asteroide que se le acerque. Los modelos predicen que, en el año 2135, Bennu pasará a menos de 300.000 kilómetros de la Tierra. Qué ocurrirá después es más difícil de predecir, pero una cosa es segura: si durante ese acercamiento Bennu atraviesa alguna de las varias regiones conocidas como «ojos de cerradura» que hay en torno a la Tierra, la suma de efectos gravitatorios lo pondrán en camino de chocar con nuestro planeta a finales del siglo XXII.



EL TAMAÑO DE BENNU, su composición primitiva y su órbita, que cruza la de la Tierra y es potencialmente peligrosa, lo convierten en un objetivo atractivo y accesible para una misión que regrese a la Tierra con muestras. OSIRIS-REx quizá solo sea la primera de ellas.

CORTESÍA DE LA NASA, CENTRO DE VUELOS ESPACIALES GODDARD

Lo cierto es que no sabemos lo suficiente sobre Bennu para predecir si en verdad atravesará uno de esos ojos de cerradura. Nuestros cálculos actuales indican una probabilidad de impacto en 2196 de aproximadamente uno entre 10.000; si consideramos todos los posibles choques con la Tierra, la probabilidad estimada de que se produzca alguno entre 2175 y 2196 es de uno entre 2700. Sin embargo, parece que Bennu tiene la misma probabilidad de ser expulsado completamente del sistema solar interior que de colisionar contra la Tierra. Si se libra de estos dos desenlaces, Bennu tendrá entonces casi un 50 por ciento de probabilidades de acabar precipitándose al Sol en un futuro, y algunas menos de chocar contra Venus. O bien, aunque estas situaciones son mucho menos probables, podría impactar con Mercurio, Marte o Júpiter. Con mejores modelos del interior, la superficie y las interacciones orbitales de Bennu —modelos que puede proporcionarnos *OSIRIS-REx*—, aumentaremos la precisión de nuestros pronósticos.

Pero la mayor contribución de OSIRIS-REx a las predicciones sobre asteroides vendrá de su estudio de un fenómeno no gravitatorio descubierto recientemente: el llamado efecto Yarkovsky (*véase el recuadro* «Muy cerca de un asteroide inquietante»). Dicho efecto describe la fuerza que actúa sobre un pequeño asteroide cuando absorbe la luz solar y vuelve a irradiar la energía al espacio en forma de calor. Cuando no está distribuida de manera uniforme por todo el asteroide, esta radiación térmica actúa como un diminuto propulsor que, con el tiempo, hace que el asteroide se desplace y cambie de órbita. Los asteroides con rotación directa, o progrado (los que giran de oeste a este, como la Tierra), se alejan del Sol debido a este impulso. En cambio, a los asteroides con rotación retrógrada, como Bennu, los lleva hacia el interior.

Ya hemos utilizado telescopios terrestres y espaciales para medir el efecto Yarkovsky sobre Bennu, y sabemos que su posición se ha desplazado más de 160 kilómetros desde su descubrimiento, en 1999. Estas mediciones revelan que Bennu probablemente se formó más lejos, en el cinturón de asteroides (en algún lugar entre Marte y Júpiter), antes de migrar hacia el interior hasta su posición actual. La iluminación solar desigual y la rerradiación térmica también pueden influir en la rotación de un asteroide, lo que explica adecuadamente la forma de peonza de Bennu: la luz solar incide de manera asimétrica sobre la su-

perficie del asteroide, de modo que su velocidad de rotación se incrementa a largo plazo y se arrastra continuamente material de la superficie desde los polos hasta el ecuador. Esta repavimentación a gran escala podría haber traído material nuevo e inalterado a la superficie de Bennu: unas condiciones ideales para obtener una muestra prístina.

OSIRIS-REx llevará a cabo un estudio detallado del efecto Yarkovsky midiendo la rotación, el área superficial y la emisión térmica de Bennu. También mediremos directamente la aceleración de Yarkovsky a lo largo de nuestro encuentro. Esto servirá para mejorar nuestra teoría del efecto Yarkovsky y nos permitirá incorporarlo a los cálculos del riesgo de impacto para todos los asteroides cercanos a la Tierra. Además, comprender mejor el efecto Yarkovsky podría resultar vital para futuras misiones de desvío de asteroides, que lo aprovecharían para empujar una roca espacial peligrosa hacia una trayectoria diferente y menos amenazante.

LA APOTEOSIS FINAL

De principio a fin (desde sus orígenes a mediados de la década de 2000 hasta su conclusión en la de 2020 y su posterior legado multigeneracional), OSIRIS-REx supondrá decenios de trabajo y cientos de millones de dólares de inversión. Todo ese esfuerzo y gasto culminará en un acto que durará tan solo cinco segundos: la maniobra de «toque y despegue» que la nave tendrá que llevar a cabo para recoger una muestra de la superficie del asteroide.

En Bennu culminarán decenios de esfuerzos en un acto que tan solo durará cinco segundos: una maniobra de toque y despegue que recogerá una muestra de la superficie

OSIRIS-REx recogerá su muestra empleando un instrumento llamado Mecanismo de Adquisición de Muestras Mediante Toque y Despegue (TAGSAM, por sus siglas en inglés). Este consta de dos componentes principales: una cabeza para tomar muestras y un brazo articulado que la coloca. La cabeza adquiere la muestra liberando un chorro de nitrógeno gaseoso que «fluidifica» el regolito y lo empuja a una cámara de recogida. El brazo articulado posiciona la cabeza para la adquisición, la trae de vuelta para realizar una documentación visual y la coloca en una cápsula para su retorno a la Tierra. Como medida complementaria, 24 elementos para la amortiguación del impacto, situados en la base del TAGSAM, adquirirán material de grano fino cuando toquen la superficie del asteroide.

OSIRIS-REx pasará la mayor parte de su estancia de tres años junto a Bennu preparándose para esta maniobra. Con sus cámaras, láseres, antenas de radio y espectrómetros, realizará múltiples estudios globales de alta resolución del asteroide. A partir de estas exploraciones, dibujaremos un «mapa del tesoro» que identificará un emplazamiento principal y otro de reserva para la recogida de la muestra, en función de la facilidad estimada de la obtención de esta, la seguridad de la operación y el valor científico esperado del material recogido. Las regiones más seguras estarán probablemente cerca del ecuador, donde a la nave le resultará más fácil ajustarse a la velocidad de giro del asteroide para poder tocar la superficie. Los sitios más valiosos desde el punto de vista científico deberían contener una gran variedad de compuestos orgánicos, minerales ricos en agua y otros materiales que ayuden a descubrir si los asteroides contribuyeron al origen de la vida en la Tierra.

Una vez que el equipo de OSIRIS-REx haya elegido el emplazamiento principal para la recogida de muestras y realizado amplios ensayos generales, comenzará la maniobra de toque y despegue. En ese momento, Bennu estará probablemente en la parte más alejada de su órbita, a más de 18 minutos luz de la Tierra. Tras enviar la orden de iniciar la maniobra, solo nos quedará sentarnos y esperar mientras se desarrolla el proceso automatizado. Mediante una serie de tres encendidos de los propulsores a lo largo de un período de horas, *OSIRIS-REx* abandonará su órbita, se alineará con el punto de recogida y descenderá lentamente hacia la superficie del asteroide, la cual tocará a una velocidad máxima de 10 centímetros por segundo. El TAGSAM tendrá cinco segundos para recoger las muestras antes de que la nave se vuelva a separar de Bennu, elevándose hasta una altura de unos 10 kilómetros sobre el asteroide. Allí llevará a cabo una serie de pruebas para garantizar que la adquisición haya tenido éxito. El TAGSAM contiene suficiente nitrógeno para realizar tres intentos de recogida de muestras; no habría una cuarta oportunidad.

Si todo va bien, en 2021 la nave espacial encenderá sus motores principales para traer su preciada muestra a la Tierra. A finales de 2023, justo después de lanzar la cápsula de retorno de muestras hacia la atmósfera de la Tierra, *OSIRIS-REx* volverá a encender sus motores para entrar en una «órbita cementerio» segura y estable alrededor del Sol. La cápsula de retorno de muestras llegará a la parte superior de la atmósfera a una velocidad de más de 45.000 kilómetros por hora, protegida por un escudo térmico que disipará más del 99 por ciento de la energía de la reentrada. A una altura de tres kilómetros, la cápsula desplegará un paracaídas y su velocidad disminuirá hasta aterrizar suavemente sobre el desierto de Utah, siete años después de haber iniciado su viaje. Un equipo de especialistas recuperará la muestra y la transportará al Centro Espacial Johnson de la NASA para almacenarla a largo plazo y repartirla de manera que la comunidad científica mundial pueda estudiarla durante generaciones.

PARA SABER MÁS

Meteorites and the early solar system II. Dirigido por Dante S. Lauretta y Harry Y. McSween. University of Arizona Press, 2006.
A cosmochemical view of the solar system. Dante S. Lauretta en *Elements*, vol. 7, n.º 1, págs. 11-16, febrero de 2011.
Asteroids: Relics of ancient time. Michael K. Shepard. Cambridge University Press, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

El remolcador de asteroides. Russell L. Schweickart et al. en *IyC*, enero de 2004.
Meteoritos primitivos. Alan E. Rubin en *IyC*, abril de 2013.
El origen del agua en la Tierra. David Jewitt y Edward D. Young en *IyC*, mayo de 2015.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



El magnetómetro de Gauss, versión 2.0

Los modernos imanes de neodimio permiten construir sencillos magnetómetros que habrían dejado boquiabierto al mismísimo Carl Friedrich Gauss

Recuerdo haber leído en alguna parte que un jovencísimo Albert Einstein recibió como regalo una brújula y quedó fascinado: con independencia de la orientación del instrumento, la aguja apuntaba siempre en la misma dirección. Se dice también que a partir de aquella observación nació un espíritu científico que, a la larga, acabaría por revolucionar el pensamiento de su época.

Sin embargo, puede que Einstein no se fijase lo bastante bien en la aguja, ya que lo cierto es que su rumbo experimenta constantes fluctuaciones. Las razones para ello son varias. En primer lugar, el norte magnético no se halla siempre en el mismo lugar. Su proyección sobre la superficie terrestre traza una espiral que, en la actualidad, lo sitúa a muchos grados del norte geográfico. Por otro lado, la brújula sufre perturbaciones locales: rocas ígneas, yacimientos minerales u obras humanas ejercen una notable influencia, la cual puede llegar a desplazar la aguja varios grados. Finalmente, y para no extendernos, citaremos otra causa de perturbación: el viento solar y su interacción con la alta atmósfera, que, al ionizarse, interfiere con el campo magnético terrestre y genera una lenta deriva del norte aparente que se repite con un ciclo de veinticuatro horas, fenómeno conocido como «variación diurna de la declinación magnética».

Debemos las primeras observaciones rigurosas y metódicas de las variaciones del campo magnético a un científico excepcional: Carl Friedrich Gauss. Este niño prodigio y revolucionario del conocimiento matemático, afrontó, en colaboración con Wilhelm Eduard Weber, el arduo trabajo de convertir en ciencia el estudio de estas perturbaciones del campo magnético, las cuales ya eran conocidas, como mínimo, desde el Renacimiento.

Nos situamos hacia los años treinta del siglo xix. Alexander von Humboldt, Francesc Aragó y otros ya habían detectado variaciones cíclicas en la declinación de la brújula. Gauss, junto con sus colaboradores, decide emprender un vasto programa de observaciones que, en pocos años, se extendería por todo el planeta.

Nuestro genio sabía que debería realizar observaciones de una finura inigualable, y con su prestigio y tesón logró la financiación necesaria para construir un observatorio no magnético: un pequeño edificio situado lejos de cualquier estructura férrea, construido en madera y con clavos de cobre, y donde antes de entrar se revisaban vestiduras y bolsillos para eliminar cualquier objeto metálico que pudiera causar una medición espuria. Dentro instaló una brújula muy especial: una larga barra imantada de varios kilos de peso, suspendida de un fino hilo de oro fijado a cinco metros de altura. La barra magnética soportaba a su vez un espejo que, junto con un pequeño telescopio, permitió a Gauss medir sobre una escala graduada desplazamientos imperceptibles a simple vista. Hoy nos propondremos emular aquel instrumento; eso sí, con los materiales que nos brinda la tecnología moderna.

En primer lugar nos haremos con un buen tubo de vidrio. Este nos servirá para situar en su interior la barra magnética, la cual quedará así protegida de las corrientes de aire. Cuanto más grande sea el tubo, mejor. Para ello, y pensando en un coste reducido, no hay nada mejor que visitar un bazar oriental. Allí encontraremos jarrones cilíndricos de vidrio blanco, exento de hierro, de todas las medidas imaginables. El tubo que reproducimos en la ilustración presenta un diámetro de 12 centímetros y una altura de 40 centímetros. Pero esto debe tomarse solo como una medida orientativa: he podido comprobar que es posible construir un buen instrumento utilizando incluso un vaso largo de whisky.

Una vez tengamos el recipiente en nuestras manos, procederemos a construir la barra magnética. Esta consta de dos imanes de neodimio bien grandes, fijados magnéticamente sobre los extremos de una barra del mismo diámetro compuesta de hierro dulce o de acero de baja aleación. Tampoco aquí hemos de obsesionarnos con los detalles: sin duda, el hierro puro posee una permeabilidad magnética óptima, pero a todos los efectos un acero con poco carbono también nos servirá.

Antes de fijar los imanes habremos torneado la barra dejando sus caras perfectamente planas, y ajustaremos su longitud de forma que el conjunto, con los imanes incluidos, sea algunos milímetros más corto que la luz interior del vaso. También deberemos perforar, justo en el centro de la barra, un agujero roscado, a fin de introducir en él una espiga roscada de latón o aluminio.

La función de la espiga es doble. Por un lado, en ella practicaremos un hueco diminuto que nos servirá para introducir el hilo que mantendrá el conjunto en suspensión. Sí es importante que este taladro sea realmente fino y que se ajuste tan exactamente como sea posible al diámetro del hilo. En el modelo que detallamos aquí, el diámetro asciende a 0,4 milímetros, la broca más pequeña de la que disponía en ese momento. Manipulando el conjunto podremos conseguir también que el punto

Magnetómetro de Gauss

1 2 3 4

∅ 120 mm × 400 mm

Taladro y espiga M8
Tapa
Tubo de vidrio
Seda dental

1 Tapa

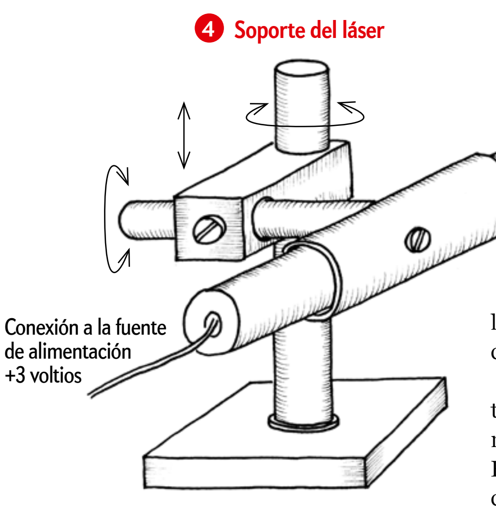
Seda dental
Espejo
Tubo de vidrio
Taladro M6
Imanes de neodimio ∅ 30 mm × 12 mm
Disco de cobre
Felpa

2 Barra magnética

3 Espejo

Cinta doble cara
Espejo de primera superficie
Escuadra de aluminio

4 Soporte del láser



MARC BOADA

de fijación del hilo de suspensión quede por encima del centro de gravedad de la barra; es decir, en una configuración de equilibrio estable. Pero, además, la espiga roscada nos permitirá fijar en ella un pequeño espejo en el que, una vez montado el instrumento, reflejaremos un haz de luz láser que podrá adoptar distintos ángulos con respecto a la barra.

Antes de colocar el espejo, sin embargo, tendremos que eliminar cualquier viruta magnética que se haya adherido a la barra. El proceso es simple: pegamos un retal de cinta adhesiva sobre las impurezas y la retiramos. Las virutillas desaparecerán como por arte de magia. Repetiremos la operación tantas veces como sea necesario hasta dejar la barra magnética limpia como una patena. Luego podemos darle una capa de barniz en espray y, una vez seco, introducir la barra en una bolsa hermética y colocarla en el congelador de la cocina. La potencia magnética de los imanes permanentes crece de manera considerable a medida que disminuye la temperatura, con lo que de esta manera elevaremos la magnetización del hierro. Una permanencia de varios días en ese ambiente gélido estabilizará su magnetismo.

Pasemos ahora al espejo. El asunto no es baladí: ese espejito ejercerá una función esencial, por lo que deberemos ser exquisitos en su selección. Necesitamos —y esto sí que resulta casi imprescindible— que se trate de un espejo aluminizado «de primera superficie». Es decir, la capa de aluminio reflectante debe estar situada sobre el vidrio y no detrás de este, como sucede en los espejos comunes. Aunque tal vez extrañe a algunos, esta disposición es la más habitual en óptica. En un espejo común, la luz debe atravesar el vidrio antes de reflejarse y, por tanto, experimenta una refracción que acaba por generar imágenes dobles. En la vida cotidiana esto no tiene importancia, ya que priorizamos la resistencia del espejo a sus propiedades ópticas. Pero, en los trabajos

de laboratorio, la doble imagen produce efectos nefastos.

Tales espejos no son imposibles de localizar. Fotocopiadoras antiguas, cámaras fotográficas «químicas» ya en desuso, escáneres, impresoras y otros muchos artefactos pueden diseccionarse para extraer tan preciado componente óptico. Luego lo llevaremos al cristalero protegido con papel de seda y, con un cortador de vidrio o una punta de diamante, lo recortaremos hasta conseguir un espejito cuadrado de unos diez o doce milímetros de arista. Además, de los aparatos que antes comentábamos será posible extraer varios espejos, de forma que podemos cortar media docena y quedarnos con el mejor. Una vez seleccionado, lo pegaremos con cinta adhesiva de doble cara a una pequeña escuadra de aluminio que, más tarde, fijaremos en la espiga roscada de la barra magnética.

Dirijamos ahora nuestra atención a la tapa del tubo. En ella habremos de fijar el hilo que mantendrá en suspensión a la barra magnética, de modo que esta cuelgue libremente en el extremo inferior. La tapa debe tornearse con cualquier material sólido y amagnético. En el caso que nos ocupa utilicé metacrilato, pero el aluminio habría servido igual de bien. Tal y como hicimos antes, en su centro exacto tallaremos un agujero roscado, donde, repitiendo el esquema de la barra magnética, introduciremos un tornillo perforado por el que pasará el hilo. Una tuerca del mismo paso que la empleada con anterioridad servirá para fijar el filamento una vez ajustada su longitud.

Después deberemos introducir, en el fondo del bote, un disco de cobre tan espeso como sea posible. Aunque colocarlo no resulta imprescindible, lo agradeceremos mucho. Pensemos en nuestro instrumento: suspendida de un finísimo hilo, la barra comenzará a oscilar ante la mínima perturbación magnética, tal y como sucede en una brújula común. El disco de cobre se encargará de amortiguar esas exasperantes oscilaciones, que pueden tardar largos minutos en desaparecer a menos que algo las frene. Aquí el freno es electromagnético: al oscilar, la barra induce corrientes eléctricas en el disco, las cuales generan un campo magnético que se opone al primero y disipa la oscilación.

Ya solo nos queda preparar el último componente del magnetómetro: el hilo de suspensión. Gauss utilizó hilos de plata o de oro. Hoy son de uso común los de cuarzo, pero todos ellos resultan difíciles de localizar o de montar.

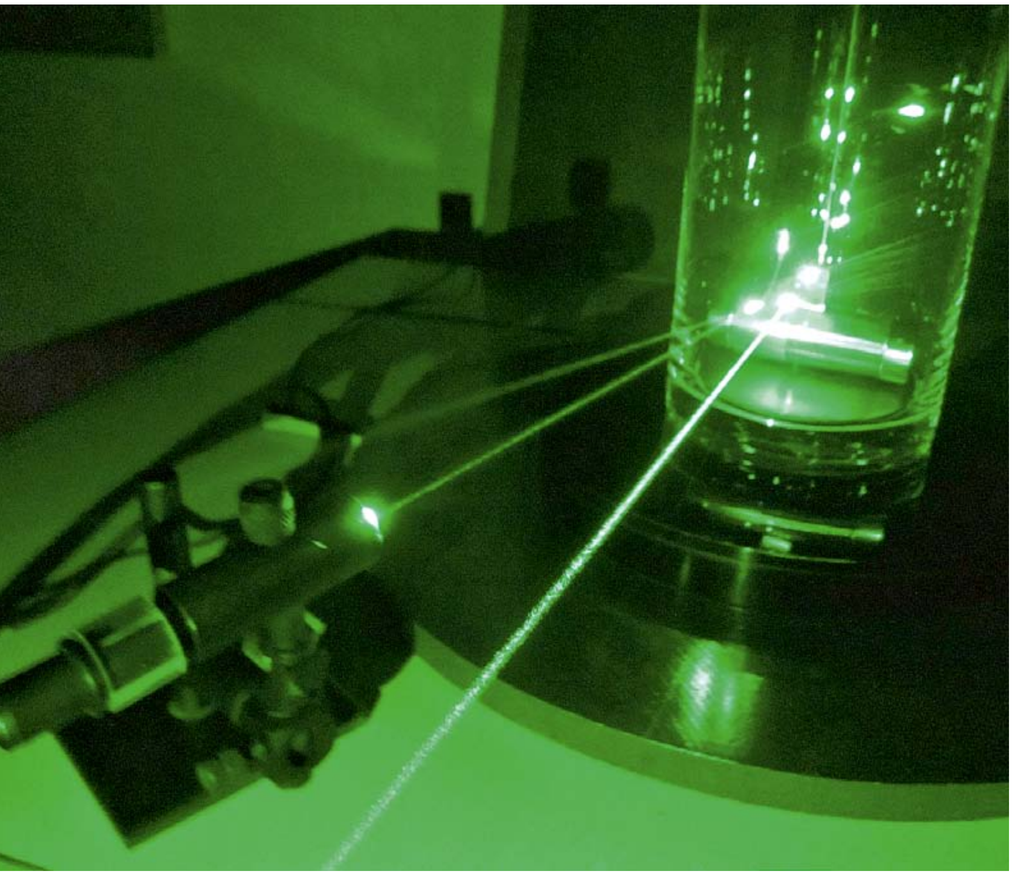
Por suerte, los materiales modernos acuden a nuestro auxilio: los mejores hilos sin torsión ya están en nuestros hogares. Solo debemos dirigirnos al cuarto de baño, registrar el armario y agenciarnos unos palmos de seda dental. Pese a lo que su nombre indica, no es seda, sino un conjunto de fibras paralelas de algún polímero especialmente tenaz. Nos desharemos de la cera que las impregna sumergiendo el material en disolvente universal para pinturas, el cual renovaremos un par de veces. Luego, con un papel absorbente, dejaremos bien secas las hebras para, después, introducir el hilo por la espiga de latón de la barra y por la de la tapa. Un nudo en el extremo inferior y una gota de adhesivo instantáneo garantizarán una fijación estable.

Acto seguido pondremos una tuerca no magnética en la espiga de latón. Introduciremos el espejo con su soporte y, finalmente, enroscaremos la barra magnética. Una advertencia: en todos estos pasos, lo que nunca debe hacerse es girar el filamento y la espiga de latón, ya que en tal caso introduciremos torsión en el hilo.

El siguiente paso consistirá en colgar la barra en el interior del tubo, suspendida a pocos milímetros sobre el disco de cobre. Para ello, tensaremos el hilo lentamente hasta llevar los imanes a esa distancia, daremos unas vueltas alrededor de la espiga superior y lo bloquearemos con la tuerca.

Seguramente comprobaremos que la barra no ha quedado horizontal: es normal que un brazo pese un poco más que el otro y que permanezca ligeramente inclinado. Para solucionar este defecto, colocaremos en el brazo ligero un retal de papel de estaño o un trocito de estaño de soldadura. Desplazándolo cuidadosamente, llevaremos nuestra aguja magnética a una posición perfectamente horizontal. El magnetómetro está listo, al menos en parte.

Pasemos ahora al rayo de luz que emplearemos para visualizar las fluctuaciones en la orientación de la barra. Gauss utilizó un pequeño anteojo con retículo en el ocular, con el que podía observar una escala reflejada en el espejo que incorporó



MARC BOADA

MAGNETÓMETRO LÁSER: Imagen del magnetómetro casero en funcionamiento. La toma de datos nocturna no solo es interesante, sino también un pequeño espectáculo óptico.

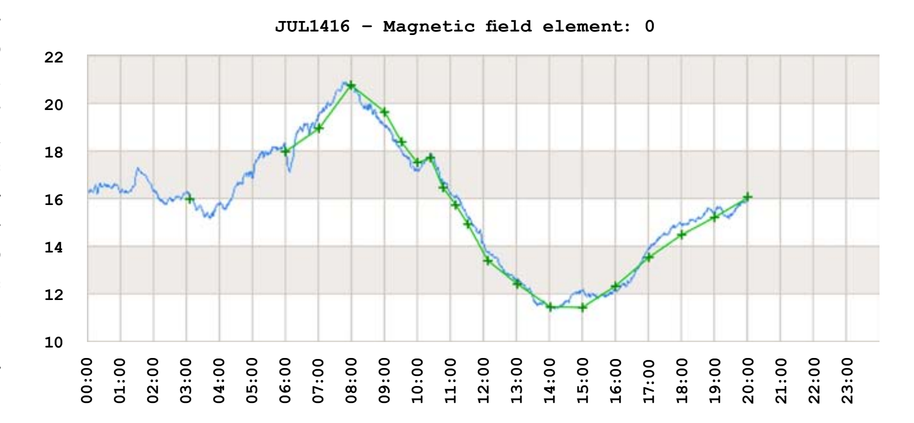
a la barra magnética. Hoy todo es más fácil: basta con reflejar en el espejo un rayo láser, lo que simplifica enormemente el montaje. Así pues, buscaremos un puntero láser de color verde —luego veremos el porqué— y construiremos un soporte que nos permita apuntarlo en distintas orientaciones y ángulos. Es también importante fabricar el soporte con materiales no magnéticos y dotarlo de masa suficiente para que sea estable y las vibraciones se minimicen.

Por fin ha llegado el momento de llevar el material a su emplazamiento definitivo. Esta es quizá la parte más difícil del experimento. Para desgracia de los estudiosos del geomagnetismo, vivimos en la edad de hierro: todo a nuestro alrededor está lleno de este maravilloso metal. En mi caso, localicé un aula cuyos elementos estructurales (vigas, ventanas y mobiliario) eran de madera. Eliminé todo lo siderúrgico que pude localizar y construí un sólido y sencillo banco de madera sobre el que colocar el instrumento. Las uniones del maderamen las hice con clavijas de madera de haya y cola de carpintero.

Luego, y sobre esa misma mesa, coloqué el magnetómetro y el puntero láser de color verde. Tardé horas en orientar el montaje hasta que el láser se proyectó en una pared situada a casi 7 metros de distancia. En ese punto fijé una hoja de papel, a modo de pantalla de proyección. Tampoco eso salió a la primera: el láser arrojaba una mancha irregular y demasiado grande. Por suerte, en pocos días hallé uno que proyectaba un disco de luz de «solo» 6 milímetros de diámetro.

En cierto momento me percaté de que, si me acercaba al magnetómetro, el rayo del láser se desviaba varios milímetros. Me costó un poco descubrir el motivo. ¿Magnetismo animal? No: los botones de mis pantalones vaqueros. También descubrí que, al caminar a solo dos metros de distancia, aparecían vibraciones que podían arruinar las medidas. La solución fue sencilla: extraje las baterías del láser y las sustituí por una pequeña fuente de alimentación que soldé con estaño a los terminales. Fijé el botón de encendido con una goma elástica e incorporé un interruptor en el largo cable eléctrico que llevaba la tensión hasta la fuente de alimentación. Con ello podía conectar el láser a distancia y, por tanto, no era necesario acercarme al artefacto.

Todo aquel que haya llegado hasta aquí no tardará en observar que la mancha luminosa que proyecta el láser se desplaza ligeramente a lo largo del día. También comprobará que su brillo es tan intenso que dificulta la observación. La solución consiste en usar unas gafas de protección con cristales de un intenso color rojo —de ahí que el láser deba ser verde—, las cuales encontraremos en tiendas de material para soldadura eléctrica. Mirando a través de ellas todo cambia. La mancha de luz verde reduce su tamaño y se restringe al punto central, lo que nos permite determinar mucho mejor su posición.



VARIACIONES MAGNÉTICAS: Gráfica de la declinación magnética publicada en la página web del Observatorio del Ebro el 14 de julio de 2016 (*azul*). El eje de ordenadas indica la declinación de la brújula en minutos de arco; el de abscisas, la hora del día. Sobre ella, los valores obtenidos con nuestro magnetómetro (*verde*).

MARC BOADA

Con todo, no resulta nada fácil saber lo que está pasando. Pero también aquí la tecnología moderna nos favorece: existe una red internacional de estudio del geomagnetismo, Intermagnet, que agrupa a observatorios altamente equipados de todo el mundo, incluidos varios españoles. Uno de ellos, el Observatorio del Ebro, publica en su página web y en tiempo real la declinación magnética de la brújula, con valores actualizados cada doce minutos. Los datos pueden encontrarse en www.obsebre.es/es/brujula.

Con esta información y unas pocas medidas podremos verificar la bondad de nuestro magnetómetro. Empecemos. En este caso, y teniendo en cuenta que la distancia de proyección era de unos 7 metros, a un desplazamiento de la barra magnética de un minuto de arco le corresponderían 2 milímetros sobre la pantalla de proyección. Pero, atención: lo que medimos es el movimiento del reflejo de la luz láser, por lo que el desplazamiento sobre la pantalla se duplica. Por tanto, a un minuto de arco le corresponderán 4 milímetros sobre la pantalla.

Sabemos también que las variaciones diurnas en la declinación de la brújula ascienden a unos 10 minutos de arco, al menos en condiciones normales de actividad solar y para nuestras latitudes. Así pues, el desplazamiento esperable de la mancha del láser a lo largo de un día deberá ser de unos 40 milímetros.

¿Cómo comprobarlo? Para ello, basta con marcar en la pantalla de proyección la posición de la mancha de luz cada cierto tiempo. Si lo hacemos, por ejemplo, cada hora durante un día completo, luego podremos plasmar esa información en una gráfica. ¿Y qué mejor grafica para comparar que la de un observatorio geomagnético? Solo deberemos introducir un factor de corrección adecuado para que, debido en parte a la diferencia entre los valores del campo magnético en cada punto, los valores obtenidos se adapten a la escala gráfica de los valores publicados; en este caso, los del Observatorio del Ebro. Si hemos puesto un poco de paciencia en los detalles, veremos que el resultado se ajusta sorprendentemente bien a lo esperado.

Nuestro sencillo magnetómetro alcanza una sensibilidad de pocos nanogauss y reproduce con gran precisión las principales fluctuaciones de la declinación magnética. Por supuesto, podemos prolongar las observaciones durante meses o años y detectar la deriva del norte magnético. También podremos emplearlo para medir la susceptibilidad magnética de aleaciones, rocas y minerales. Este modesto instrumento funciona tan bien que, sin duda, habría dejado pasmado a nuestro estimado Gauss. IyC

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



Programación dinámica

Plantarse o no plantarse, esa es la cuestión

¿Cuál es más digna acción del ánimo, sufrir los tiros penetrantes de la fortuna injusta, u oponer los brazos a este torrente de calamidades, y darlas fin con atrevida resistencia?

(William Shakespeare, *Hamlet*)

La vida es una apuesta continua. Todos asumimos riesgos en mayor o menor grado, y todos decidimos plantarnos cuando nos parece que los posibles perjuicios superan a las posibles ganancias. ¿Podemos crear una estrategia matemática para abordar tales asuntos?

Hay juegos donde el problema fundamental reside justamente en eso, en encontrar el momento para plantarse en una sucesión de turnos de apuestas. Consideremos el siguiente pasatiempo, que guarda cierto parecido con el *blackjack* o con las siete y media: disponemos de cinco lanzamientos de un dado de seis caras; podemos plantarnos en cualquiera de las tiradas y el juego habrá terminado, en cuyo caso cobraremos en euros la puntuación que marque el dado en ese momento. ¿Cuál es la estrategia óptima para maximizar la ganancia? Es decir, ¿cuándo deberíamos plantarnos?

Es obvio que, si en alguna tirada sale un 6, debemos plantarnos y cobrar los 6 euros correspondientes, puesto que esta es la máxima cantidad que podremos obtener. Pero ¿qué ocurre si hemos lanzado el dado, digamos, dos veces sin que salga un 6, y en la tercera tirada sacamos un 5? ¿Nos arriesgamos a que salga un 6 en alguno de los dos lanzamientos que nos quedan, o mejor nos plantamos y nos llevamos a casa los 5 euros, ya asegurados, de la tercera tirada?

La respuesta no es sencilla a primera vista. Para abordarla necesitaremos el concepto de ganancia media, así que dediquemos unas líneas a su definición.

Ganancia media

La ganancia de un juego de azar tiene que ver con cuánto deberíamos estar dispuestos a pagar por participar en él. Supongamos un sorteo con tres posibles premios: uno de 5000 euros, que se gana con probabilidad de 0,001 (es decir, el 0,1 por ciento de las veces); otro de 500 euros, que se gana con probabilidad de 0,01; y, finalmente, uno de 50 euros, que se gana con una probabilidad de 0,1. ¿Cuál sería el precio justo de un billete en este sorteo?

Supongamos que jugamos un millón de veces. El 0,1 por ciento de un millón es 1000; por tanto, en aproximadamente 1000 ocasiones ganaremos 5000 euros. En promedio, unas 10.000 veces nos llevaremos 500 euros, y en unas 100.000 ocasiones obtendremos 50 euros. Así pues, la ganancia media total después de jugar un millón de veces será:

$$\begin{aligned}&1.000.000 \times 0{,}001 \times 5000\\ &+ 1.000.000 \times 0{,}01 \times 500\\ &+ 1.000.000 \times 0{,}1 \times 50\\ &= 15.000.000 \text{ euros.}\end{aligned}$$

El precio justo debe ser tal que no haya una ganancia o pérdida con respecto a este valor. Por tanto, para que la apuesta fuera justa, tendríamos que pagar 15 millones de euros para jugar un millón de veces; es decir, unos 15 euros por turno.

Podemos emplear el mismo argumento para cualquier número de repeticiones. De hecho, el número de intentos aparece multiplicando a todos los términos de la ecuación anterior, de modo que podemos dividir a ambos lados por dicho número y obtener así el precio justo del billete:

$$0{,}001 \times 5000 + 0{,}01 \times 500 + 0{,}1 \times 50 = 15 \text{ euros.}$$

Este precio justo es precisamente la ganancia media del premio en un turno: el promedio de los diferentes premios pesados con sus respectivas probabilidades. En los juegos de azar, la banca suele cobrar algo más del precio justo para asegurarse una ganancia neta final.

Observemos que la ganancia neta media que podemos esperar de un juego es la ganancia media del juego menos la cuota que hemos pagado por participar. La cuota justa será aquella que no produce ni ganancias ni pérdidas sistemáticas ni para el jugador ni para quien organiza el juego. Decimos que un juego es justo si esta ganancia neta es cero.

En *Enigmas of chance* (1985), el célebre matemático polaco Mark Kac expli-

Turno	Me planto si mi tirada es	Ganancia esperada justo antes de la tirada		
		Me planto	+ Continúo	Total
5		$\frac{1}{6} \times (1+2+3+4+5+6)$		$= \frac{7}{2} = 3{,}50$
4	4, 5 o 6	$\frac{1}{6} \times (4+5+6)$	$+\frac{3}{6} \times \frac{7}{2}$	$= \frac{17}{4} = 4{,}25$
3	5 o 6	$\frac{1}{6} \times (5+6)$	$+\frac{4}{6} \times \frac{17}{4}$	$= \frac{14}{3} \approx 4{,}67$
2	5 o 6	$\frac{1}{6} \times (5+6)$	$+\frac{4}{6} \times \frac{14}{3}$	$= \frac{89}{18} \approx 4{,}94$
1	5 o 6	$\frac{1}{6} \times (5+6)$	$+\frac{4}{6} \times \frac{89}{18}$	$= \frac{277}{54} \approx 5{,}13$

¿ME PLANTO? Disponemos de cinco tiradas con un dado de seis caras; tras cada lanzamiento, podemos plantarnos y cobrar en euros lo que marque el dado, o continuar jugando. La estrategia óptima en cada turno depende de la ganancia esperada en el siguiente, la cual puede calcularse con facilidad reconstruyendo el juego «hacia atrás» (*tabla*).

caba a través de una divertida anécdota personal cómo aplicar el concepto de ganancia neta media:



Una semana apareció un anuncio del Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología ofreciendo un puesto de profesor de matemáticas con un salario de 150 libras anuales; ser ciudadano británico no era un requisito. El salario era tan escaso que supuse que ningún ciudadano británico respetable estaría interesado en ese trabajo. Fui a preguntar a Steinhaus [su director de tesis] *si debía o no optar al puesto. Por entonces no sabía ni una palabra de inglés, pero estaba dispuesto a jurar que mis conocimientos eran los suficientes. «Déjame pensar», me dijo Steinhaus. «Estimo que la probabilidad de que consigas el trabajo es de una entre mil. Si multiplicas eso por 150 libras, tienes tres chelines.* [Una libra equivalía en aquel entonces a 20 chelines.] *Eso es mucho más de lo que cuesta enviar la carta, así que deberías hacerlo.» Lo hice, pero el trabajo fue al final para un ciudadano británico (después de todo, sí que había alguno interesado).*

Como vemos, la receta puede aplicarse a cualquier tipo de «sorteo».

Volvamos a nuestro juego, donde tiramos un dado y recibimos en euros la puntuación obtenida. ¿Cuál debería ser la cuota justa para participar en el juego con un solo lanzamiento? La respuesta es, simplemente, el valor medio de la puntuación, que en el caso de un dado no sesgado es $(1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)/6 = 7/2 = 3{,}5$ euros. Ese sería el precio justo que debería cobrarnos la banca por pagarnos la puntuación en euros de un lanzamiento. Si jugáramos repetidas veces, el beneficio neto de la banca y el nuestro sería, en promedio, cero.

Cuarto lanzamiento

Veamos ahora cómo el concepto de ganancia media nos permite encontrar el criterio óptimo para saber si debemos plantarnos o continuar lanzando el dado en nuestro juego original, con hasta cinco posibles tiradas. Situémonos en el cuarto lanzamiento, el penúltimo, y supongamos que el resultado de la tirada es un 3. ¿Debemos plantarnos o arriesgarnos con un último intento?

Si nos arriesgamos, nuestra ganancia media será de 3,5 euros. Así que, si decidimos continuar, estaremos dejando de cobrar 3 euros para entrar en un sorteo cuya ganancia media es de 3,5 euros. Por decirlo de otra manera, estaríamos pagando una cuota de 3 euros para participar en un sorteo cuya cuota justa es de 3,5 euros. De modo que, en este caso, lo más favorable es no plantarnos y arriesgarnos a un quinto lanzamiento.

En general, si el resultado de la cuarta tirada es superior a la cuota justa (es decir, 4, 5 o 6), entonces la estrategia óptima será plantarse. Si, por el contrario, es 1, 2 o 3, lo mejor será arriesgarse con una quinta tirada.

Sin duda, esta estrategia es óptima si jugamos un gran número de veces. Si solo vamos a hacerlo un turno, la valoración del riesgo se convierte en una cuestión subjetiva a la que la teoría de la probabilidad no puede dar respuesta. Por eso, la anécdota de Mark Kac tiene cierto aire socarrón. Alguien con aversión al riesgo puede quedarse con un 3 en la cuarta tirada, pensando que es preferible tener 3 euros seguros que probar suerte con un quinto lanzamiento, donde puede que acabe con tan solo 1 o 2 euros. Si vamos a jugar muchas veces, esa decisión sería absurda, puesto que, de media, ganamos 3,5 euros en cualquier tirada.

Tercer lanzamiento

Consideremos ahora qué ocurre después del tercer lanzamiento. Para ello, calculemos primero la ganancia esperada antes de la cuarta tirada. Como hemos dicho, si el resultado de la cuarta tirada es 4, 5 o 6, nos plantaremos y no nos arriesgaremos con una quinta, pues la ganancia esperada es de 3,5 (menos de lo que indica nuestro dado). La probabilidad de obtener con la cuarta tirada 4, 5 o 6 euros es de 1/6 para cada caso. Si sacamos 1, 2 o 3, algo que ocurre con probabilidad de 3/6, nos arriesgaremos a un quinto lanzamiento, cuya ganancia media es de $7/2 = 3{,}5$ euros. Por tanto, la ganancia esperada inmediatamente antes de la cuarta tirada es:

$$1/6 \times (4 + 5 + 6) + 3/6 \times 7/2 = 17/4 = 4{,}25 \text{ euros.}$$

Este valor medio nos servirá ahora para encontrar el criterio óptimo tras la tercera tirada. Supongamos que el resultado es 5 o 6. En ese caso, deberíamos plantarnos, puesto que la ganancia esperada antes de la cuarta tirada es de $17/4 = 4{,}25$ euros, menor que 5 o 6. Por el contrario, si el resultado del tercer lanzamiento es 1, 2, 3 o 4, es aconsejable continuar, puesto que 4,25 es mayor que todas estas cantidades. Vemos, por tanto, que el criterio en la tercera tirada es algo más exigente que en la cuarta.

Segundo lanzamiento

Calculemos ahora la ganancia esperada justo antes de la tercera tirada. Con una probabilidad de 1/6 obtendremos un 5 o un 6, en cuyo caso nos plantaremos para asegurar cualquiera de esas cantidades. Por otro lado, y con una probabilidad de 4/6, obtendremos 4 puntos o menos y continuaremos jugando. Así pues, la ganancia media esperada justo antes del tercer lanzamiento es:

$$1/6 \times (5 + 6) + 4/6 \times 17/4 = 14/3 \approx 4{,}67 \text{ euros.}$$

Observemos que, para calcular este valor, hemos necesitado conocer la ganancia esperada inmediatamente antes de la cuarta tirada, la cual calculamos previamente y valía 17/4. Ahora, este nuevo resultado para el tercer lanzamiento nos permite encontrar el criterio óptimo para el segundo. Como 4,67 es mayor que 4 y menor que 5, deberíamos plantarnos si en la segunda tirada obtenemos 5 o 6, y continuar en caso contrario. Como vemos,

el problema se resuelve calculando «hacia atrás», desde la última tirada hasta la primera. La tabla que reproducimos al principio incluye un resumen del cálculo para las cinco tiradas.

Principio de optimalidad

El juego de los dados que hemos presentado aquí, del que tuve conocimiento gracias a Ramón Muñoz Tapia por medio de Juan Manuel R. Parrondo, con quien estoy escribiendo un libro donde tocamos el tema, es uno de los ejemplos más simples del llamado «principio de optimalidad de Bellman». Fue enunciado en 1953 por el matemático aplicado estadounidense Richard Ernest Bellman (1920-1984) y se emplea en procesos en los que hay que tomar una serie de decisiones (como plantarse o no plantarse) y se desea optimizar una cantidad (en nuestro caso, la ganancia en el juego).

El principio establece que la secuencia de decisiones óptima es tal que, en cualquier momento del proceso, las decisiones que quedan por tomar solo dependen del estado del sistema en ese instante y no de las decisiones pasadas. Es decir, para encontrar la estrategia óptima, basta con que nos situemos en cierto momento (el turno del juego, en nuestro caso), observemos el estado del sistema (el resultado del dado) y tomemos la decisión sopesando sus consecuencias futuras.

En nuestro ejemplo, el proceso consiste en comparar la ganancia obtenida si nos plantamos con la ganancia media esperada si continuamos. El principio de Bellman nos muestra la forma de encontrar una estrategia óptima: comenzamos por la última decisión y vamos «hacia atrás», exactamente como hemos hecho en el juego del dado.

El problema del dado puede formularse de modo más preciso y más general. El umbral $u(n)$ a partir del cual me debo plantar tras la tirada n viene dado por la ganancia media $g(n+1)$ justo antes del lanzamiento $n+1$, es decir:

$$u(n) = g(n+1)\,.$$

Por otro lado, la ganancia media $g(n)$ antes de la tirada n se obtiene promediando los valores por encima del umbral $u(n)$, cuya probabilidad es de 1/6 para cada uno (en la tabla, los valores de la columna «Me planto»), y los que están por debajo, que también ocurren con probabilidad 1/6, pero que dan lugar a una ganancia media $g(n+1)$, puesto que continúo jugando (en tabla, los valores de la columna «Continúo»). Matemáticamente, dicho promedio se escribe así:

$$g(n) = \sum_{r \geq u(n)} r \cdot p(r) + \sum_{r < u(n)} g(n+1) \cdot p(r)\,,$$

donde las sumas recorren los posibles valores de r en una tirada: $r = 1, ..., 6$. Con estas dos ecuaciones podemos obtener el umbral $u(n)$ y la ganancia media $g(n)$ en un turno n a partir del umbral $u(n+1)$ y la ganancia media $g(n+1)$ en el turno siguiente. Esta clase de relación recibe el nombre de recurrencia, que en este caso no es trivial y comienza en la última tirada.

Pueden imaginarse la cantidad de situaciones en las que cabe aplicar el principio de optimalidad: en toda clase de problemas de logística y planificación de procesos industriales, de producción y distribución de energía, transporte, economía... El principio de optimalidad de Bellman es la base de toda una disciplina de la matemática moderna con infinidad de aplicaciones: la programación dinámica.

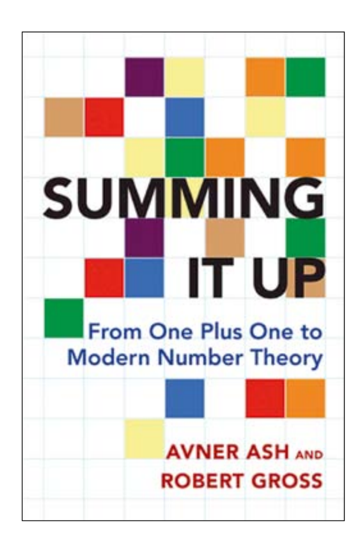
El nombre resulta un tanto extraño. Su origen lo relata el propio Bellman en sus memorias, donde confiesa que se inventó ese estrambótico apelativo para evitar confesar ante Charles E. Wilson, secretario de Defensa de los EE.UU. en los años cincuenta, que estaban haciendo matemáticas en la Corporación Rand, una famosa organización de asesoramiento del Ejército estadounidense. Sobre Wilson, Bellman dice lo siguiente: «Sentía un miedo y una abominación patológicos ante la palabra *investigación*. [...] La sangre se le subía a la cabeza, su cara enrojecía y se volvía violento si la gente utilizaba la palabra *investigación* en su presencia. Pueden imaginarse entonces cómo se hubiera sentido ante la palabra *matemáticas*».

Bellman pensó que *programación* era una palabra suficientemente neutra como para contentar a todo el mundo, y que *programación dinámica* era un término al que «ni siquiera un congresista podría poner objeciones». IyC

PARA SABER MÁS

Eye of the hurricane: An autobiography. Richard E. Bellman. World Scientific, 1984.

Richard Bellman on the birth of dynamic programming. Stuart Dreyfus en *Operations Research*, vol. 50, n.º 1, págs. 48-51, enero-febrero de 2002.



SUMMING IT UP
FROM ONE PLUS ONE TO MODERN NUMBER THEORY

Avner Ash y Robert Gross
Princeton University Press, 2016

Teoría de números

Una introducción a las formas modulares no apta para todos los públicos

La teoría de números resulta fascinante, entre otras cosas, porque muchas de las preguntas o conjeturas que maneja son fáciles de entender por el público general. Sin embargo, las respuestas o las demostraciones suelen ser extremadamente difíciles y técnicas, hasta el extremo de que, a menudo, los especialistas han tardado siglos en resolverlas y muchas siguen aún abiertas.

En el intento de solucionar tales problemas, de apariencia tan inocente que parecen sacados de un libro de pasatiempos, se han generado una gran cantidad de nuevas matemáticas e incluso áreas que antes no existían. La primera frase de *Summing it up*, «Sumar dos números enteros es una de las primeras cosas que aprendemos en matemáticas», es, en este sentido, toda una declaración de intenciones.

El tema principal del libro será jugar con las sumas, y ese juego nos llevará de manera natural a su objetivo principal: las formas modulares, el instrumento del análisis complejo más fecundo en la teoría de números moderna. Que, como ejemplo de lo que comentábamos antes, ha acabado aplicándose a áreas tan aparentemente alejadas de su nacimiento como la teoría de cuerdas o la topología algebraica.

Los autores de *Summing it up*, Avner Ash y Robert Gross, son profesores de matemáticas en el Boston College. Esta obra es la última de una trilogía sobre teoría de números pensada para un público con conocimientos generales de matemáticas. Fue antecedida por *Elliptic tales: Curves, counting, and number theory* primero y luego por *Fearless symmetry: Exposing the hidden patterns of numbers*, de los mismos autores y publicados también por Princeton University Press. El primer libro discute cuestiones como las ecuaciones diofánticas y el último teorema de Fermat. El segundo trata sobre problemas relacionados con las curvas elípticas, como la conjetura de Birch y Swinnerton-Dyer, uno de los famosos Problemas del Milenio del Instituto Clay. Los tres libros pueden leerse de manera independiente.

Summing it up está dividido en tres partes. La primera, «Sumas finitas», comienza con una aburrida lista de conceptos básicos en teoría de números: máximo común divisor, identidad de Bézout, primos, congruencias, teorema de Wilson, residuos cuadráticos... para pasar después a abordar la cuestión, respondida en su momento por Fermat, de qué números pueden expresarse como suma de dos cuadrados.

Una vez se está enganchado al problema, resulta inevitable que surjan más preguntas similares: ¿qué números pueden expresarse como suma de tres, cuatro o cinco cuadrados? Hasta llegar, en el capítulo 3, a la demostración, debida originalmente a Legendre, de que todo entero positivo puede expresarse como la suma de cuatro cuadrados, y acabar con el mismo problema generalizado más allá de los cuadrados a potencias arbitrarias k. La generalización se conoce como problema de Waring, y hoy en día sigue siendo objeto de investigación.

Tras este calentamiento, el libro pasa a abordar en el capítulo 5 sumas como $1 + 2 + 3 + ... + n$ y $1^2 + 2^2 + 3^2 + ... + n^2$, hasta alcanzar la idea de Pascal para sumar $1^k + 2^k + 3^k + ... + n^k$ usando series telescópicas. De manera natural, aparecen así los números y los polinomios de Bernoulli.

La segunda parte, llamada «Sumas infinitas», comienza con una digresión sobre series geométricas, series binomiales y su extensión a potencias reales. Sigue con la presentación de la función exponencial en variable compleja, las series de potencias y el concepto de continuación analítica. Se presenta la función zeta de Riemann y su conexión con los números de Bernoulli, así como el concepto de función generatriz y de series de Dirichlet para realizar un primer acercamiento al famoso problema de las particiones: ¿de cuántas maneras podemos escribir un número n como suma de otros enteros positivos?

Si hasta aquí llevamos unas 120 páginas, la tercera parte, titulada «Formas modulares y sus aplicaciones» ocupa casi el mismo espacio. Tras comenzar con nociones de geometría hiperbólica y teoría de grupos, se definen las transformaciones lineales fraccionarias y, finalmente, las formas modulares.

Tradicionalmente, cierto tipo de funciones han recibido el nombre de «formas»; por ejemplo, un polinomio $f(\mathbf{v})$ es una «forma de peso k» si $f(a\mathbf{v}) = a^k f(\mathbf{v})$. Una forma modular de peso k se define como una función $f(z)$ analítica en el semiplano superior complejo, que cumple:

$$f((az+b)/(cz+d)) = (cz+d)^k f(z) ,$$

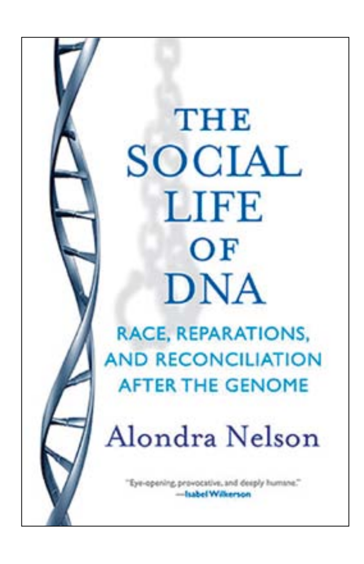
(donde a, b, c y d son los elementos de una matriz bidimensional de determinante uno, $ad - bc = 1$) y cuyo módulo permanece acotado cuando la parte imaginaria tiende a infinito. Tras presentar las expansiones-q, las series de Eisenstein y los grupos congruentes, se acaba retomando el problema de las particiones presentando la relación entre la función de partición, introducida previamente, con las formas modulares [*véase* «El oráculo de Ramanujan», por Ariel Bleicher; Investigación y Ciencia, agosto de 2014].

Según los autores, con conocimientos elementales de álgebra y geometría de bachillerato, y con conocimientos básicos sobre series infinitas y cálculo diferencial e integral, el libro puede seguirse. La obra ambiciona, tal y como se explicita en prefacio, hacer comprensible a una audiencia con nociones generales de matemáticas ciertas ideas de la teoría de números. Los autores parecen creer que el libro puede ser entendido por lectores que solo han cursado un año de cálculo. Desde mi punto de vista, se trata de una pretensión muy optimista, por no decir descabellada.

Dudo que pueda escribirse un libro sobre formas modulares accesible para estudiantes con ese nivel. Es cierto que Ash y Gross se toman su tiempo en definir términos y conceptos matemáticos generales, como espacio vectorial o grupo. Pero siempre lo hacen brevemente por razones de espacio, y parece necesario un alto grado de madurez matemática para seguir los razonamientos. Se necesita tiempo y cierta familiaridad con tales cuestiones para asimilar todos los nuevos conceptos antes de pasar a los siguientes. Por ejemplo, en poco más de diez páginas, se pasa de las transformaciones de la función exponencial en el plano complejo y la geometría hiperbólica, a grupos matriciales y transformaciones lineales fraccionarias. Algo que, sin duda, resultará excesivo para alguien que carezca de una buena formación matemática.

Si bien no recomendaría el libro al público que proponen los autores, sí que lo haría a profesionales interesados en una introducción a las formas modulares. Resulta difícil encontrar literatura accesible y el libro es una buena primera aproximación al tema. Más allá de eso, creo que la obra refleja, con la selección de temas y la forma de presentarlos, la actividad que desarrollan los matemáticos que trabajan en teoría de números. En palabras de Ash y Gross: «La pregunta genera teoría, la teoría genera nuevas preguntas, y las conjeturas nos guían a lo largo del camino».

—Bartolo Luque
Universidad Politécnica de Madrid



THE SOCIAL LIFE OF DNA
RACE, REPARATIONS, AND RECONCILIATION AFTER THE GENOME
Alondra Nelson
Beacon Press, 2016

Raíces

Repercusiones sociales de los avances genéticos

Los análisis genéticos, incluidos los aplicados al origen de los europeos, han resultado determinantes para esclarecer aspectos oscuros de la historia de las poblaciones. La investigación de las modernas diásporas africanas llegadas a Estados Unidos se halla todavía en una fase inicial, condicionada por las limitaciones que rodean el conocimiento del fenómeno de la esclavitud. Una vez en América, las familias fueron divididas y vendidos sus miembros como esclavos, en transacciones a menudo orales, sin papeles ni registros, o se destruyeron los pocos que hubiere. Los africanos transportados en barcos a Norteamérica a través de un viaje tortuoso, conocido como *Middle Passage*, perdieron sus señas de identidad en un proceso de racialización. Dejaron de ser personas; eran solo negros. Al margen de su lengua, religión y formación cultural nativas, el esclavo quedó reducido a negro, siervo despojado de todo vínculo con un pasado.

Socióloga experta en temas de raza, etnia y ciencia, Alondra Nelson ha sido directora del Instituto de Estudios sobre Mujer, Género y Sexualidad de la Universidad de Columbia. La investigación sobre su propio pasado le llevó a la redacción de *The social life of DNA: Race, reparations, and reconciliation after the genome*. Anhelaba saber hasta qué punto los tests genéticos fundamentaban las teorías raciales. La experiencia mostraba su eficacia en el foro y en medicina, pero ¿en qué medida permitían averiguar la historia genealógica del individuo, de sus parientes y de su pueblo?

Los estudios craniométricos de los restos esqueléticos habían arrojado luz sobre la nutrición, enfermedades y estragos de la esclavitud; la morfología dentaria aportaba las signaturas químicas del origen y el entorno del individuo; en particular, la concentración relativa de estroncio 86 y estroncio 87. La prueba genética a la que se sometió la propia autora mostró su parentesco con la población bamileke del Camerún. (Desde entonces, le afecta todo lo relacionado con ese país como si se tratara de algo propio.)

Para iniciarse en el campo hay que leer *A narrative of the life and adventures of Venture, a native of Africa, but resident above sixty years in the United States of America, related by himself*, de Venture Smith (1729-1805). Fue este un esclavo que en 1798 dictó sus memorias a Elisha Niles. Sus recuerdos pintan un cuadro valioso, por único, de un aborigen de África occidental que fue llevado a América y esclavizado. Detalla su vida en Dukandarra, Guinea, el nombre de su padre (Saungm Furro), el suyo propio (Broteer Furro) y su captura a manos de una partida extranjera encabezada por un tal Baukurre. Tras cumplir con sus obligaciones de esclavo, sacaba horas extra que le permitieron comprar su libertad en 1765. Continuó trabajando y, entre 1769 y 1775, pagó la libertad de su mujer y la de sus tres hijos.

El interés en los orígenes africanos recibió un impulso determinante en 1977 con la publicación de *Black genealogy*, de Charles L. Blockson. Ese mismo año quedó establecida la Sociedad Histórica y Genealógica Afroamericana, la primera institución negra dedicada a la genealogía y la historia de las familias. La genealogía es la segunda afición en importancia entre los estadounidenses. Se recurre al análisis genético para desmadejar el enredo de la esclavitud en beneficio de la reconciliación del individuo con su pasado, para establecer la casa paterna, replantearse la ciudadanía y restañar las heridas abiertas de los años de humillación. En la praxis de la genealogía intervienen diversas herramientas técnicas; entre ellas, el Marcador del Árbol de Familia y otros programas informáticos.

Las raíces genéticas han llegado hasta los padres de la patria, con las repercusiones sociales y políticas que ello conlleva. ¿Fue Thomas Jefferson progenitor de los

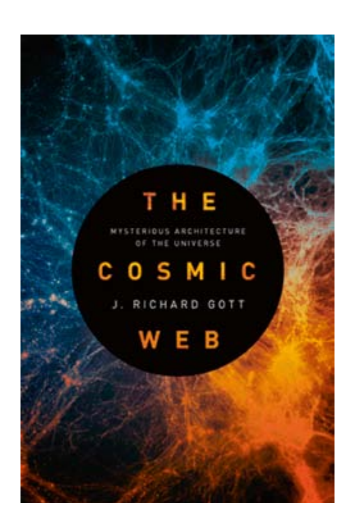
hijos de Sally Hemings, su esclava negra? El análisis del ADN de los descendientes fue una de las primeras aplicaciones de la técnica genética en Estados Unidos. Se compararon genes de descendientes reconocidos de Jefferson con los de los presuntos sucesores.

El análisis se centró en determinadas secuencias del cromosoma Y para determinar si había lazos familiares. Este ADN pasa de padres a hijos en su mayor parte intacto, por lo que puede emplearse para trazar una línea directa de antepasados masculinos. En este caso, se comparó el ADN del cromosoma Y de los descendientes masculinos del tío paterno de Jefferson con el de los descendientes de dos vástagos de Hemings. El padre del menor de los hijos de Hemings era Jefferson. El hijo de una esclava compartía su genoma con un padre fundador.

No sería el único. Años más tarde, otros que aducían descender de James Madison (redactor de la constitución estadounidense y sucesor de Jefferson en la presidencia de la nación) se aprestaron a recurrir a la misma estrategia para demostrar su lugar en el clan y en la historia del país. Había abundantes pruebas históricas que lo avalaban, pero una parte se negó a someterse al examen genético. En junio del año 2000, concluida la secuenciación del genoma humano, el presidente Bill Clinton declaraba que de la triunfante expedición al corazón del genoma humano emergía la constatación de que todos los seres humanos, cualquiera que fuera su raza, eran iguales en un 99,9 por ciento. El hecho más importante de la vida sobre la Tierra era la humanidad común.

Pese a ello, en 2014 Nicholas Wade publicó un incendiario *A troublesome inheritance: Genes, race, and human history*. Contra toda prueba científica, Wade afirmaba allí que había tres razas biológicamente distintas: africana, asiático-oriental y caucasiana, dotada cada de un comportamiento social distinto e inviolable. En razón de esas diferencias se explicaban las diversas sociedades humanas. Wade atribuye el esplendor de Occidente a los genes superiores de los caucasianos, que producían sociedades emprendedoras, mientras que los genes africanos producían culturas de violencia y recelo, y los asiático-orientales, prácticas de disciplina rígida y estratificación. La herencia genética de estos dos últimos grupos impedía el desarrollo de la sociedad y su cohesión. El texto fue desacreditado por la ciencia. Carecía de base experimental y le sobraba ideología.

—Luis Alonso



THE COSMIC WEB
MYSTERIOUS ARCHITECTURE OF THE UNIVERSE
J. Richard Gott
Princeton University Press, 2016

Topología del cosmos

Un universo espongiforme

El libro de la naturaleza, afirmó Galileo Galilei, está escrito en lenguaje matemático; sus símbolos son triángulos, círculos y otras figuras geométricas. Así ocurre con la disposición de las galaxias en el universo. Para entenderla hay que acudir a la matemática, en particular a la topología, rama que estudia las propiedades de las figuras geométricas que permanecen inalteradas tras la distorsión. Debemos a J. Richard Gott, profesor de astrofísica de la Universidad de Princeton, la idea de un universo espongiforme, constituido por cúmulos y filamentos galácticos intrincadamente conexos entre sí. Una estructura poderosa denominada «red cósmica», cartografiada extensamente, que representaría el origen del cosmos y su evolución a lo largo de los miles de millones de años transcurridos. La esponja cósmica de Gott se inspiró en la morfología de la esponja marina.

Gott tenía dieciocho años cuando descubrió un grupo de estructuras similares a esponjas, entrelazadas, hechas de triángulos, cuadrados, pentágonos o hexágonos, algunas de las cuales dividían el espacio en dos regiones iguales. Eran poliedros regulares espongiformes: figuras compuestas de polígonos regulares cuya disposición en torno a cada vértice es idéntica. Había aprendido en el bachillerato que los griegos de la Antigüedad clásica reconocían la existencia de cinco poliedros regulares (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro). El adolescente precoz pensó entonces que no estaba todo dicho. Le había precedido Johannes Kepler en esas dudas sobre la doctrina clásica de los cinco sólidos platónicos. Kepler creía que las teselaciones poligonales regulares del plano debían considerarse también poliedros.

The cosmic web arranca con esos recuerdos y con los pioneros de la astronomía extragaláctica, Edwin Hubble y Fritz Zwicky. Suele afirmarse que Hubble (1889-1953) descubrió el universo. Si, con su microscopio elemental, Leeuwenhoek descubrió el mundo microscópico, Hubble utilizó el telescopio de 100 pulgadas de diámetro de Monte Wilson para descubrir el universo macroscópico. Antes de Hubble se sabía que vivíamos en la Vía Láctea, de la que ahora conocemos que es un disco en rotación de 300.000 millones de estrellas. (Sirio, la estrella más brillante del firmamento, se encuentra a unos 9 años luz de la Tierra.) En 1918 nuestra percepción del lugar que ocupamos en el mundo comenzó a cambiar. Harlow Shapley descubrió que el Sol no ocupaba el centro de la Vía Láctea, sino que residía a medio camino de la periferia. Así como Copérnico sacó la Tierra del centro del sistema solar y puso al Sol en el centro, Shapley sacó al sistema solar del centro de la Vía Láctea y lo ubicó en los arrabales. Pero el gran descubrimiento de 1918 sería pronto eclipsado, en dos ocasiones, por Hubble.

Hubble estudió la nebulosa de Andrómeda, considerada una nube de gas en el interior de la Vía Láctea. Descubrió que Andrómeda era, en realidad, una galaxia, del tamaño aproximado de la Vía Láctea

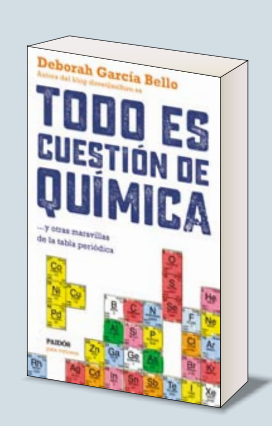
y muy distante. Había, además, otras muchas nebulosas espirales en el universo, todas ellas galaxias. Clasificó las galaxias por su forma: elípticas, espirales e irregulares. Apuntó el telescopio en diferentes direcciones y contó el número de galaxias vistas. Parecía que hubiera una cuantía similar en todas las direcciones: el universo era homogéneo. Hubble no se detuvo. Calculó la distancia a que se encontraban tales galaxias. A partir de los espectros de las galaxias, midió su velocidad. Se percató de que, cuanto más alejada se encontraba una galaxia, con mayor rapidez se distanciaba de nosotros. El universo entero se hallaba en expansión. Si el universo no era estático, como pensaron Newton y Einstein, entonces no podía ser infinitamente viejo.

En los años treinta, cuando era profesor de física en el Instituto de Tecnología de California, Zwicky (1898-1973) acometió la primera inspección telescópica moderna del firmamento nocturno. A él debemos el cambio profundo en la comprensión del universo. Antes de Zwicky, persistía arraigada la concepción aristotélica de la esfera celeste como una región de armonía y tranquilidad eternas; para el astrónomo se reservaba la tarea de levantar mapas precisos de un panorama inmutable. Con Zwicky emergió una nueva visión del universo, una realidad dinámica dominada por episodios violentos. Convenció al Caltech para que comprara una cámara Schmidt de 18 pulgadas y la instalara en el Observatorio de Monte Palomar. Entendió Zwicky que, para observar episodios raros, violentos y de corta vida, tenía que fotografiar repetidamente zonas extensas del firmamento. De su inspección emergieron dos descubrimientos importantes: las supernovas y la materia oscura. Zwicky observó 20 supernovas, muestra suficiente para permitirle clasificarlas en distintos grupos e inferir sus diferentes modos de originarse. Su descubrimiento de la materia oscura se produjo al estudiar el movimiento de las galaxias en los cúmulos y calcular que la masa visible de estos no bastaba en absoluto para causar los movimientos observados.

Durante la Guerra Fría, la escuela estadounidense de cosmología privilegió un modelo de universo donde las galaxias residían en cúmulos aislados. Por su parte, la escuela soviética favorecía un modelo de universo en panal, con galaxias perfiladas por vacíos aislados e inmensos. Gott, que junto con Mario Jurić midió la Gran Muralla Sloan de galaxias (con una longitud de 1370 millones de años luz, una de las mayores estructuras del universo), publicó, junto con M. Dickinson y A. Melott, su modelo espongiforme en 1986: «The sponge-like topology of large-scale structure in the universe», aparecido en *Astrophysical Journal*. El universo era una suerte de esponja con galaxias que tejían una densa red cósmica. Esa telaraña emergió como resultado de la gran explosión y se transformó desde un tamaño subatómico hasta adquirir proporciones cósmicas. La hipótesis de Gott, apuntalada en la teoría de la inflación cósmica, ha sido corroborada por la contrastación telescópica.

—Luis Alonso

NOVEDADES



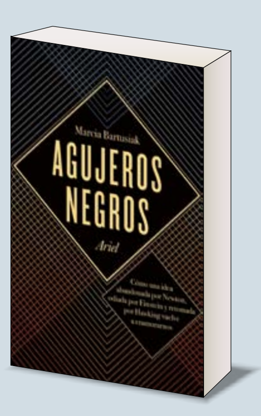
TODO ES CUESTIÓN DE QUÍMICA
... Y OTRAS MARAVILLAS DE LA TABLA PERIÓDICA
Deborah García Bello
Paidós, 2016
ISBN: 978-84-493-3188-6
288 págs. (16,95 €)



SIMETRIES PER A TOTHOM
UN RECORREGUT PLE DE SORPRESES PER L'ART I LA CIÈNCIA
Dirigido por Miquel Àngel Cuevas-Diarte
Edicions Universitat de Barcelona, 2016
ISBN: 978-84-475-3979-6
224 págs. (22 €)



DESAFÍOS DEL FUTURO
DOCE DILEMAS Y TRES INSTRUMENTOS PARA AFRONTARLOS EN EL DUODÉCIMO MILENIO
Pere Puigdomènech
Crítica, 2016
ISBN: 978-84-16771-03-5
300 págs. (21,90 €)



AGUJEROS NEGROS
CÓMO UNA IDEA ABANDONADA POR NEWTON, ODIADA POR EINSTEIN Y RETOMADA POR HAWKING VUELVE A ENAMORARNOS
Marcia Bartusiak
Ariel, 2016
ISBN: 978-84-344-2402-9
260 págs. (19,90 €)

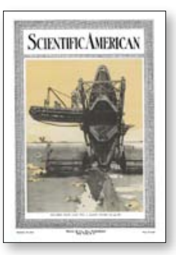
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Septiembre 1966

Inteligencia artificial

«Para que un programa se automejore sustancialmente, debería disponer al menos de un conocimiento rudimentario de su propio proceso de resolución de problemas y cierta capacidad para reconocer una mejora cuando halle una. No hay razones intrínsecas que se lo impidan a una máquina. Al disponer de un modelo de su propio funcionamiento, podría emplear su propia potencia de resolución de problemas para perfeccionarse a sí misma. Los programas actuales no son lo bastante inteligentes para ese propósito; solo pueden acometer la mejora de programas mucho más simples que ellos mismos. Una vez que hayamos ideado programas con una auténtica capacidad de automejora, se iniciará un proceso de evolución rápida. Sin embargo, es poco razonable pensar que, cuando las máquinas se hayan vuelto tan inteligentes como nosotros, dejen de automejorarse. —Marvin L. Minsky»



Septiembre 1916

Películas

«El público está tenso de emoción mientras el héroe de la película finge luchar frenéticamente con los mandos de un submarino que se hunde con rapidez hacia el fondo del mar. Meses atrás, esa escena se representaba, no a bordo de un submarino, como podría suponerse, sino en algún tranquilo rincón de un estudio cinematográfico (*véase la ilustración*). Durante semanas los artesanos de los talleres del estudio habían estado construyendo ese falso submarino, y, antes de la primera vuelta de manivela de la cámara, el director técnico había revisado cada detalle de la construcción para cerciorarse de que imitaba perfectamente el interior de un submarino moderno. Hoy los directores se esfuerzan en respaldar la calidad de las historias y la actuación con una escenografía del máximo realismo.»

El azote de la polio

«La epidemia de parálisis infantil, o poliomielitis, que actualmente asola el estado y la ciudad de Nueva York y que se extiende sobre buena parte de Estados Unidos, es la más grave de la historia médica. El 1 de septiembre, el número de víctimas solo en el estado de Nueva York era de 10.000, mientras que la cifra máxima conocida en cualquier epidemia anterior fue de 3840, la cual se registró en Suecia en 1911. Tan cruel enfermedad no ha atraído la atención de la ciencia médica hasta hace poco. Debe haber existido, sin duda, desde el tiempo más remoto; pero no fue descrita hasta 1841, cuando se dieron once casos en Luisiana.»

Primera noticia sobre tanques

«Nos están llegando unos extraños relatos procedentes de los campos de batalla del norte de Francia. Casi creeríamos que nuestro viejo amigo el barón de Münchausen ha cobrado vida si no fuera porque los extraordinarios hechos de esta guerra nos han preparado para aceptar como posibles las historias más disparatadas. Los corresponsales de guerra nos han estado hablando de una enorme máquina británica que salta por encima de las trincheras y los embudos de bomba, que arrolla los árboles en vez de rodearlos, que se goza en derribar las paredes de ladrillo de las casas y en reptar por su interior aplastando al enemigo.»

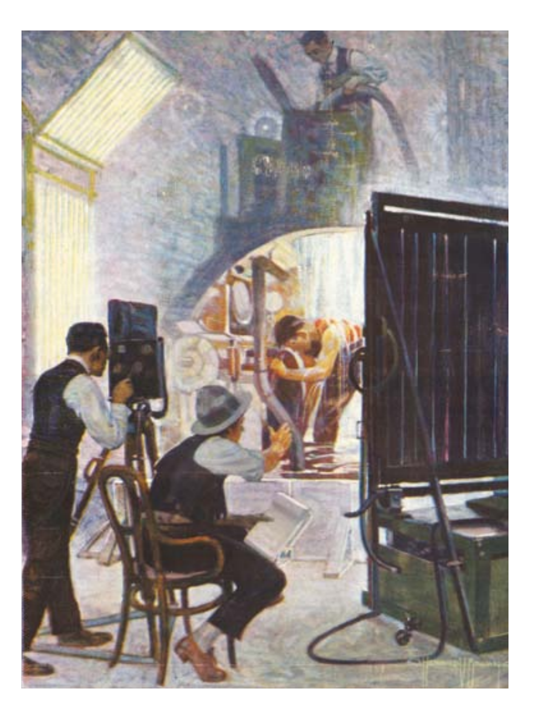
Los tanques se emplearon por primera vez en Francia el 15 de septiembre de 1916 en la batalla de Flers-Courcelette.



Septiembre 1866

Futuro lejano

«La Luna debe estar acercándose muy lentamente a la Tierra, y ambos cuerpos entrarán en contacto en el futuro lejano. La corteza sólida de nuestro planeta se quebrará en el choque, la destrucción del movimiento de la Luna generará una inmensa cantidad de calor y se fusionarán en un solo globo. A la vez, la Tierra orbita en torno al Sol acercándose a este más y más y, al final, caerá, como un guijarro minúsculo, en aquella inmensa masa incandescente. El mismo destino aguarda a todos los planetas, y un día nuestro sistema solar no será sino un globo único. Cuando este se enfríe hasta alcanzar la temperatura adecuada, podría ser cubierto por una multitud de habitantes, y podrían surgir astrónomos que observen sus revoluciones alrededor de los soles asociados de nuestro sistema estelar. Si sus conocimientos e intelecto igualan la ciencia de nuestros astrónomos, pronosticarán la reunión final de todos esos soles en un globo común.»



1916: Técnicos del cinematógrafo se afanan por dotar de realismo al relato del hundimiento de un submarino.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CIX, N.º 18, 1 DE NOVIEMBRE DE 1913



EVOLUCIÓN

La paradoja de Huntington

Chiara Zuccato y Elena Cattaneo

El gen que provoca una devastadora enfermedad neurodegenerativa también puede haber sido crucial para la evolución de nuestra especie.

BIOMEDICINA

Una década de células CMPI

Megan Scudellari

Diez años después de su descubrimiento, las células madre pluripotentes inducidas están transformando la investigación biológica.



COSMOLOGÍA

El lugar más vacío del universo

István Szapudi

Los esfuerzos por explicar un extraño punto frío en el cosmos han acabado por desvelar algo aún más misterioso: una inmensa extensión que apenas contiene materia.



ESPECIAL 40 ANIVERSARIO

Investigación y Ciencia nació en octubre de 1976. Para celebrar con nuestros lectores este aniversario tan especial, el próximo número reunirá a los fundadores de la revista, el equipo actual, colaboradores destacados y algunos lectores en una fiesta de recuerdos, experiencias y deseos.

Además, 15 de las personalidades más destacadas de la comunicación científica en España compartirán con nosotros su forma de entender la apasionante tarea de acercar la ciencia a la sociedad.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
PUBLISHER AND VICE PRESIDENT Jeremy A. Abbate

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes y Tendencia mundial de las enfermedades*; Sara Arganda: *Videojuegos que potencian el cerebro*; Javier Grande: *El misterio de los cúmulos globulares, Nuestro lugar en el cosmos y Siete años de misión para reunir 60 gramos de asteroide*; Blanca Álvarez: *El síndrome post-ébola*; Joandomènec Ros: *Tras la pista del tigre*; Luis Cardona: *Las medusas, unas nadadoras excelentes*; Alfredo Marcos: *La frontera filosófica de la cosmología moderna*; José Óscar Hernández Sendín: *La importancia de regresar a la Luna*; Mercè Piqueras: *Cultivos resistentes a la sal*; Alfonso Susanna: *CRISPR llega a los cultivos*; Ramón Muñoz Tapia: *El magnetómetro de Gauss, versión 2.0*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España